

Murielle Naïtali

Que serions-nous sans eux ?

Les microbes de notre quotidien

éditions Quæ

Murielle Naïtali

Que serions-nous sans eux ?

Les microbes de notre quotidien

Éditions Quæ

Ce livre est le deuxième d'une collection de culture scientifique qui s'attache à synthétiser, de façon très accessible, les connaissances contemporaines dans un large champ thématique. Elle s'adresse à un public d'adultes comme de jeunes pour satisfaire et prolonger leur curiosité.
En s'appuyant sur l'actualité, le quotidien et l'environnement, les auteurs transmettent leur goût de l'observation, racontent leurs expériences, partagent leurs émotions. L'occasion de découvrir comment la science avance, une science vivante, avec ses tâtonnements, ses fulgurances, ses anecdotes et ses controverses.
Laissez-vous emmener par cette collection qui pratique l'étonnement !

ISBN : 978-2-7592-2747-1

Éditions Quæ
RD 10
78026 Versailles Cedex, France
www.quae.com

Sommaire

Prologue

Une fête de famille se prépare, où dix personnes seront réunies. Dix, comme dans un célèbre roman d'Agatha Christie. Mais ici, pas de disparition, pas de meurtre, juste un moment comme on en a tous vécu. Ces dix membres d'une même famille se retrouvent pour fêter les 16 ans de Louise.

Nous sommes samedi, à la veille de cette fête. Chacun s'active de son côté et va nous faire partager un moment de sa journée. Avec ses propres préoccupations, liées à son âge, à son caractère. Mais vous et moi, observateurs omniscients, nous allons décrypter leurs faits et gestes avec les yeux de microbiologistes passionnés.

Retrouvons donc nos protagonistes à 10 heures du matin…



1
LOUISE, L'ADOLESCENTE COQUETTE

Où l'on fait connaissance avec les microbiotes intestinal, buccal et cutané du corps humain. Une initiation qui met en scène des biofilms, chamboule certaines idées reçues sur l'hygiène et permet de recueillir quelques conseils pour choyer son microbiote cutané.



Louise, 16 ans moins un jour, est une adolescente bien dans sa peau. Elle a ses petits tracas et ses grands enthousiasmes. Avec ses longs cheveux et ses yeux bleu-gris, elle se trouve physiquement correcte. Sa petite sœur l'admire et s'est aperçue que Louise plaît à plusieurs garçons.

À 10 heures, Louise ouvre la porte de sa chambre et se faufile dans la salle de bains. Sait-elle qu'elle emporte avec elle des tas de compagnons invisibles, ses microbiotes ?

D'invisibles compagnons

Louise, 48 kg toute mouillée pour 1 m 60. Ces 48 kg ne sont pas que des cellules humaines. Par exemple, le microbiote intestinal représente en moyenne 2 kg chez chacun d'entre nous. Eh oui, nous cohabitons tous avec notre microbiote intestinal, mais aussi avec nos microbiotes cutané, buccal, vaginal (pour les femmes), pulmonaire (car même les poumons sains ne sont pas stériles, contrairement à ce que l'on a longtemps cru)… Tous ces microbiotes sont différents. Ils sont tous personnels.

Le microbiote est l'ensemble des microbes vivant avec un hôte. On lui donne parfois le nom de « flore » et l'on précise souvent l'environnement : flore intestinale bovine, flore cutanée humaine, etc. Chez un individu, les microbiotes totalisent entre 10^{13} et 10^{14} bactéries (à comparer à nos 10^{13} cellules humaines). Ils comprennent toutes sortes de microbes (y compris des virus) qui coexistent, s'excluent, s'entraident, se neutralisent entre eux. Et interagissent avec notre corps, même si nous ne les voyons pas.

Lorsque j'ai commencé mes études, il y a une trentaine d'années, les microbes étaient étudiés comme au temps de Pasteur, en les cultivant. Puis vinrent la génétique (l'étude de gènes ciblés) et la génomique (l'étude du génome, l'ensemble des gènes d'un individu), qui ont permis de s'intéresser aux bactéries non cultivables. Nous en

sommes maintenant à la métagénomique, qui étudie les microbiomes, c'est-à-dire l'ensemble des génomes d'un milieu donné et les interactions entre ces génomes. Les microbiomes humains ont ainsi révélé la diversité des microbiotes et une partie des fonctions qu'ils remplissent. Notre microbiome intestinal contient plus de 600 000 gènes bactériens. Notre ADN en a 23 000. Par ailleurs, les gènes microbiens peuvent évoluer rapidement, faisant de nos microbiotes des champions de l'adaptabilité.

Toujours au début de mes études, les microbes ne semblaient vivre qu'en suspension dans des milieux liquides. Mais, à la même époque, on s'est aperçu qu'ils passaient la majeure partie de leur vie fixés à des surfaces. Ces agglomérats ont été nommés « biofilms », et l'on a découvert qu'ils présentaient des caractéristiques particulières

Une grande microbiodiversité

Les microbes constituent la majorité de la biomasse vivante sur Terre. Ils participent à l'équilibre de notre planète. Ainsi qu'à notre propre équilibre. Bien que très divers, les microbes ont en commun :

- leur petite taille (environ 0,01 µm pour les virus, 1 µm pour les bactéries, et 10 µm pour les levures — l'ordre de grandeur des cellules sanguines),
- leur invisibilité à l'œil nu à l'état individuel,
- des possibilités de dissémination importantes,
- et des capacités d'échanges (de composés, de gènes) élevées leur permettant de se multiplier et d'évoluer rapidement.

Bactéries, champignons (moisissures, levures) et acariens font partie de nos microbiotes. Mais les plus abondants sont les virus, qui ont pour particularité l'incapacité à se reproduire seuls. Ils injectent leur matériel génétique (ARN ou ADN) dans une cellule hôte, détournent la machinerie cellulaire à leur profit, et se multiplient. Ils seraient au nombre de 10^{35} à notre surface et à l'intérieur de nous.

Tout reste à découvrir sur les virus de nos microbiotes. Et s'ils luttaient contre les microbes pathogènes ? Probablement. Nombre de ces virus sont des bactériophages. Leurs cellules cibles sont donc des bactéries, qu'ils peuvent détruire. Mais ils font sûrement bien plus. Et s'ils étaient nos maîtres bienveillants ? L'avenir nous le dira…

par rapport aux microbes libres en milieu liquide. Parmi les caractéristiques les plus remarquables : leur structuration spatiale et leur résistance aux conditions environnementales néfastes (antibiotiques, désinfectants). Les microbes en biofilm sont aussi capables de dialoguer entre eux par des signaux moléculaires qui déclenchent une réponse microbienne coordonnée, à partir d'un certain seuil. Cela porte le nom de « détection du haut nombre », ou *quorum sensing*. Les microbiotes sont des biofilms (de l'épithélium intestinal, des particules du bol alimentaire, de la couche cornée de la peau, de la muqueuse buccale…). L'étude des microbiotes bénéficie ainsi de la somme de connaissances en cours d'accumulation sur les biofilms.

Dans la vie de tous les jours, on parle assez peu des rôles de nos microbiotes. Néanmoins, des publicités sur des laits fermentés nous promettent un « confort intestinal ». Elles nous proposent implicitement de choyer et de « booster » notre microbiote intestinal avec des microorganismes ingérés vivants. Le microbiote intestinal est impliqué dans la digestion, mais pas seulement (voir chapitre 8). Certaines de ses fonctions sont identiques à celles du microbiote cutané, par exemple faire barrière à l'implantation de microbes pathogènes.

À chaque peau ses microbes

Ce week-end, Louise est la reine : pas question d'apparaître négligée. Un coup d'œil au miroir la rassure. Ouf ! Aucun bouton n'est apparu cette nuit.

Ces boutons redoutés proviennent d'une altération — ou dysbiose — du microbiote cutané, qui se met à rougir, gratter ou « fleurir ». Pour une fois, parlons de microbiote cutané sain ! La peau saine héberge une flore cutanée installée, non pathogène, appelée « flore résidente commensale ». D'autres microbes peuvent tempo-

rairement la rejoindre, sans s'implanter durablement. La peau abrite en moyenne 1 000 milliards (10^{12}) de bactéries, qui se trouvent en surface (couche cornée), dans les recoins (glandes sudoripares et follicules pilo-sébacés), et même « infiltrées » (derme et hypoderme, longtemps supposés stériles). Comme tous les microbiotes, le microbiote cutané est sélectionné : il résulte d'un équilibre entre les conditions de son environnement et les propriétés métaboliques de ses microbes.

Le microbiote de Louise n'est pas le même que celui d'Antoine, son père. Différence homme-femme ? Les hommes ont un microbiote quantitativement plus important que les femmes. Mais n'allons pas en déduire qu'ils se lavent moins, cela n'a que peu de rapport. Le microbiote est aussi moins diversifié chez les hommes. L'acidité plus importante de leur peau serait un facteur de sélection. Louise n'a pas non plus le même microbiote que sa mère ou que sa petite sœur Flore. Question d'âge ? Cela joue, évidemment. Chaque individu vit quatre grandes périodes : l'enfance, l'adolescence, l'âge adulte et la vieillesse. Son microbiote cutané évolue avec ces périodes. À chaque fois, il forme une empreinte microbienne qui lui est propre.

La composition du microbiote cutané varie en fonction de l'âge, de facteurs génétiques, alimentaires, géographiques… C'est une question de sueur, d'hormones, de sébum, d'épaisseur de peau et, peut-être, de produits cosmétiques. Malgré tout, c'est un de nos caractères, tout comme la couleur de nos cheveux.

Choyer ses microbes cutanés

Sous la douche, Louise chante et s'empare de son shampooing. Elle se prépare à perturber la microflore de son cuir chevelu…

Notre microbiote cutané est une communauté à l'équilibre. Mais attention, *à l'équilibre* ne signifie pas statique. Le microbiote se renouvelle constamment pour s'adapter à la desquamation de la

peau, ainsi qu'aux pratiques d'hygiène corporelle. Lorsque Louise se lave la tête, c'est une tempête qui s'abat sur le microbiote de son cuir chevelu. Il subit non seulement l'action mécanique du lavage, mais également celle, chimique, des tensio-actifs dégraissants et des conservateurs du shampooing. Rappelons d'ailleurs l'importance de bien se rincer pour laisser le moins de traces possible de ces produits sur nos cheveux. Toutes les composantes microbiennes sont touchées par le lavage, certaines plus que d'autres. Il faudra 4 à 7 jours pour que le microbiote du cuir chevelu de Louise se rétablisse. Juste à temps pour un nouveau shampooing. Les microbiotes sont dans un équilibre en constant rééquilibrage !

La capacité d'une population de microbes — ou d'animaux, de plantes — à assurer son retour à l'état initial se nomme « homéo-

Désinfecter à bon escient

Lingettes désinfectantes, gels hydroalcooliques désinfectants, savons liquides désinfectants, etc., se sont multipliés ces dernières années. Certains sont peu efficaces. Utiliser les autres trop souvent peut se révéler néfaste et conduire au développement de mycoses.

Après un lavage, le microbiote cutané se rétablit par homéostasie. Néanmoins, une fréquence excessive de lavage ou un lavage trop agressif ont un effet négatif sur la peau et entraînent une desquamation exagérée. Des changements dans la flore microbienne cutanée peuvent également se produire, l'empêchant d'accomplir son rôle de barrière. Par exemple, des doigts désinfectés sont facilement colonisables par des streptocoques pathogènes ; mais, si une autre population microbienne s'installe en premier, les streptocoques n'y parviennent plus.

Avant de cuisiner ou de toucher un bébé, il reste vivement conseillé de se laver les mains (avec un savon classique) en incluant les espaces entre les doigts, les poignets, voire les avant-bras. La désinfection des mains, avec un savon désinfectant liquide par exemple, est utile dans certains cas particuliers : avant de cuisiner si l'on est malade, ou si l'on cuisine pour des personnes au système immunitaire altéré (personnes immuno-déprimées). Après une blessure, la désinfection cutanée reste bien entendu primordiale.

stasie ». Elle est importante, car le microbiote cutané remplit des fonctions capitales, et son déséquilibre peut entraîner des maladies, dont certaines chroniques.

La peau maintient un équilibre délicat entre les microbes commensaux qui l'habitent, tout en repoussant les envahisseurs potentiellement dangereux. Elle a ses propres mécanismes de défense. Et le microbiote cutané l'aide. Déjà, il occupe le terrain et consomme les nutriments disponibles. Premier arrivé, premier servi. Ensuite, il modifie ce terrain : *Propionibacterium acnes*, en hydrolysant le sébum, acidifie la peau. Si ça ne suffit pas, le microbiote cutané produit, par exemple, des bactériocines ou des peptides antimicrobiens qui peuvent être fatals aux envahisseurs. Enfin, plus subtil, il participe au déclenchement, chez l'hôte, de réactions de défense (immunité, voir chapitre 8).

Le microbiote cutané s'illustre aussi dans des domaines autres que la protection contre les pathogènes. Par exemple, *Propionibacterium acnes* produit la protéine antioxydante RoxP qui limite le stress oxydatif, lequel est responsable de nombreuses maladies inflammatoires, et parfois de cancers cutanés.

Le microbiote cutané de Louise ne se fait pas uniquement transporter et nourrir par elle. Il lui rend de multiples services. D'ailleurs, son appellation de « flore résidente commensale » ne reflète pas l'actualité de nos connaissances : commensal vient de *cum* (avec) *mensa* (table) et signifie « qui est avec, à table ». Une relation commensale indique donc une relation qui profite à l'invité — ici le microbiote cutané —, tandis qu'elle est neutre pour l'hôte — vous et moi. Or la relation microbiote/homme est très positive pour l'hôte. On devrait donc parler ici de mutualisme, voire de symbiose (qui implique une relation nécessaire), et renommer le microbiote cutané « flore résidente symbiotique ».

En attendant, quel que soit son nom, Louise doit choyer son microbiote pour préserver sa peau. Voici cinq conseils pour le

visage : commencer le matin par une lotion non agressive, sans alcool, pour garder le microbiote régénéré de la nuit ; le soir, nettoyer les impuretés (traces de maquillage, poussières, squames de peau morte) sans produit agressif ; utiliser uniquement de l'eau tiède (30-35 °C), car la chaleur détruirait le microbiote ; choisir des produits avec le minimum de conservateurs, ceux-ci tuant les microbiotes ; supprimer les produits trop alcalins, la peau a un pH de 5 que le microbiote cutané aime.

L'industrie cosmétique commence à percevoir l'importance de ce microbiote. Des eaux thermales cosmétiques contiennent naturellement la bactérie *Vitreoscilla filiformis*, qui participe à leurs propriétés. Certains soins ou lotions sont enrichis en composés favorisant le développement du microbiote (comme le sucre mannose), voire en bactéries (*Lactobacillus*, *Vitreoscilla filiformis*).

Quand l'équilibre microbien est perturbé

Louise termine sa douche et se sèche. En tant qu'adolescente, elle a la chance de n'avoir que quelques légers boutons sur le front, masqués par une mèche judicieusement arrangée. Ce n'est pas le cas de tout le monde. Au moment où les hormones s'affolent, la production de sébum augmente et le microbiote varie. De l'acné peut apparaître.

Une des bactéries responsables de l'acné est *Propionibacterium acnes*. La même que celle qui nous rend des services ? Non, pas tout à fait. Des souches pathologiques s'implantent chez les sujets acnéiques. De plus, les lésions d'acné peuvent aussi contenir des *Staphylococcus epidermidis* et des *Corynebacterium*, alors pathogènes. C'est ennuyeux : les biofilms pluriespèces sont plus difficiles à éradiquer que ceux monoespèces. Heureusement, de nouvelles pistes de traitement sont prometteuses. L'ingestion de probiotiques, notamment, donne des effets bénéfiques sur l'acné. Le microbiote

cutané est impliqué dans l'acné. Il semblerait donc que le microbiote intestinal le soit aussi.

Le déséquilibre du microbiote cutané peut aller dans le sens de l'augmentation de la diversité microbienne (cas de l'acné), ou au contraire d'une perte de cette diversité. Par exemple, dans la dermatite atopique (un type d'eczéma), *Staphylococcus aureus* devient dominant, et l'application d'une crème « à *Vitreoscilla filiformis* » a un effet positif sur cette maladie. On connaît l'expression « soigner le mal par le mal ». Ici on pourrait dire « soigner le microbiote par le microbiote ».

Une « aura » microbienne

Louise se sèche les cheveux, saute dans son jean et son tee-shirt préféré. Elle se lave les dents. Une légère crème. Un peu de mascara. Un pschitt de parfum. La star est prête.

On l'aura compris : pour choyer son microbiote cutané, crème et fond de teint sont à utiliser avec modération. Du mascara ? C'est possible. Mais le sien. Les acariens des cils se régalent de résidus de peau et de sébum dans ou à proximité des follicules pileux ; ils peuvent se transférer au mascara, tout comme les autres microbes présents. D'ailleurs, dans la salle de bains, peu de choses s'échangent : ni la serviette, ni la brosse à dents, ni le gant de toilette (que l'on évite), ni le baume ou le rouge à lèvres, ni le mascara… On se doit d'être égoïste et de garder son microbiote. Précautions supplémentaires : on jette le rouge à lèvres en cas d'herpès, et le mascara en cas de conjonctivite.

À noter : les produits cosmétiques affichent une date de péremption s'ils se conservent jusqu'à trente mois, ou une période après ouverture (indiquée par un nombre de mois à côté d'un pot ouvert) pour les autres. Passé cette date ou cette période, les produits ne sont plus garantis.

La plaque dentaire, un biofilm modèle

De même que Pasteur, découvreur des microbes au XIXe siècle, est le père de la microbiologie, Costerton est le pape des biofilms. Grâce à ce chercheur américain, ils ont été abondamment étudiés à partir des années 1990. Pourtant, dès le XVIIe siècle, Antoni van Leeuwenhoek avait observé les premiers microbes, déjà organisés en biofilms, sur sa propre plaque dentaire. Ce commerçant qui aimait les pierres précieuses avait conçu des loupes très puissantes pour les admirer… ce qui lui a permis de décrire des « animalcules ».

La plaque dentaire est idéale pour présenter toutes les étapes de la vie en biofilm. D'abord, la surface de la dent est conditionnée par des protéines contenues dans la salive. Ensuite, les premières bactéries, en provenance du microbiote buccal, adhèrent de manière réversible, puis irréversible. Des microcolonies se forment. D'autres microbes sont recrutés. Certains excrètent une matrice protectrice. Le biofilm se structure, jusqu'à ce qu'il soit perturbé par le brossage dentaire. Non éliminée, la plaque dentaire se minéralise à partir des sels de phosphate et de calcium de la salive. Le tartre s'installe.

Streptococcus mutans et *Lactobacillus* sont des germes commensaux de la plaque dentaire, mais, lorsqu'un déséquilibre pathologique s'installe, ils participent à l'apparition de gingivites et de caries dentaires. Certains bains de bouche antiseptiques nous sont vendus comme antitartre, anticaries, anti-mauvaises odeurs. Personnellement, je me méfie de tout ce qui déséquilibre le microbiote buccal. Par exemple, si les bactéries régressent, elles peuvent laisser le champ libre à la levure *Candida albicans*, responsable du muguet.

Louise emprunte parfois le parfum de sa mère. Pourquoi pas ? Nous sommes nombreux à utiliser parfums et déodorants pour masquer notre odeur. L'odeur corporelle est effectivement propre à chacun d'entre nous. Elle est liée à notre alimentation, notre santé, mais aussi à notre génome et… à notre microbiote cutané. Cette odeur est modifiée par notre environnement direct (notre savon, nos produits cosmétiques, notre parfum) et indirect (l'air ambiant).

Louise l'a noté : lorsqu'elle fait du sport, elle transpire, et l'odeur qui se dégage n'est pas très agréable. Sa petite sœur, Flore, transpire

aussi, mais sans odeur. Quelle chance ! Non, ce n'est pas une question de chance, mais d'âge. Avant l'adolescence, seules certaines glandes sudoripares sont actives, celles dites « eccrines ». On en a partout sur le corps, et en particulier sur le front et la paume des mains ; leur rôle majeur : réguler la température. Les glandes eccrines émettent principalement de l'eau salée, qui ne permet pas le développement des bactéries. À l'adolescence, d'autres glandes sudoripares se mettent en route : les glandes apocrines, situées notamment sous les aisselles. Elles font partie des caractères sexuels secondaires. Les protéines et lipides inodores sécrétés par ces dernières sont dégradés en acides volatils — malheureusement malodorants — par des *Corynebacterium* sous les aisselles et par des *Brevibacterium epidermidis* sous les pieds. Les microbes se régalent et se multiplient. Nous avons ainsi environ 10^7 bactéries par cm^2 au niveau des aisselles, contre 100 par cm^2 sur le tronc.

Des solutions contre les odeurs sont vantées tous les jours sur nos écrans de télé. 24 h, 48 h, 72 h de fraîcheur. Qui dit mieux ? Les antitranspirants sont de plus en plus efficaces. Mais quel est le degré de toxicité de leurs composés ? Et quel impact ont-ils sur le microbiote ? Des études récentes répondent à cette dernière question : l'utilisation d'antitranspirants réduit dramatiquement le microbiote, qui ne se rétablit que profondément modifié, à l'arrêt de cette utilisation. Des staphylocoques remplacent alors les corynébactéries. Les antitranspirants engendrent donc une dysbiose.

Louise est prête et libère la salle de bains. Elle y laisse une trace odorante, mais aussi microbienne. Nous transférons des microbes aux surfaces que nous touchons et nous en libérons également dans l'air. Nous vivons ainsi entourés d'un nuage de microbes qui nous est propre, et qui subsiste au moins transitoirement après notre passage. Une sorte d'aura microbienne invisible… sauf pour quelque miroir magique.



2
VALÉRIE, LA MÈRE, MÉNAGÈRE DU WEEK-END

Où l'on voit que le nettoyage est souvent plus adapté que la désinfection quand il s'agit d'hygiène dans la cuisine et d'autres lieux de la maison. Où l'on apprend que de nombreuses bactéries exercent une action sur le cerveau et que certaines peuvent même nous mettre d'humeur joyeuse.



Comme beaucoup de femmes, Valérie a plusieurs vies. La journée, elle est comptable. Le soir et le week-end, elle est la mère de Louise et de Flore, et la femme d'Antoine. Alors, pour être sereine, elle fait des listes : de courses, de choses à faire, de menus… qu'elle affiche sur la porte du frigo. Et elle organise. Antoine l'appelle en plaisantant « ma prévoyante ».

Aujourd'hui samedi, à 10 heures, Valérie entame le ménage. Elle souhaite une maison impeccable pour la fête de sa fille. Mais sait-elle qu'elle doit accepter, voire souhaiter, une certaine quantité de microbes ?

La maison, un nid à biofilms

Avant toute chose, Valérie fait sortir Youpi, le chien. Ses poils sont une catastrophe pour toute ménagère qui se respecte !

La présence d'animaux domestiques peut d'ailleurs se déduire de la composition en bactéries de la poussière d'une maison. Avec le ratio homme-femme, c'est l'un des principaux facteurs de cette composition. Ces constats proviennent d'une étude impliquant 1 200 foyers américains. Les poussières analysées ont révélé un mélange de bouts d'insectes, de pollen, de cellules humaines mortes, de poudre murale sèche, de fibres de tapis et de particules de sol. Ce que nous appelons « mouton » contenait aussi des biofilms naissants. En effet, à ces agglomérats étaient fixées des bactéries (125 000 espèces différentes ont été trouvées) et des champignons (2 000 espèces). Les champignons, surtout des moisissures, provenaient de l'extérieur de la maison. Les bactéries provenaient des microbiotes des habitants, à deux ou quatre pattes, relargués dans la maison.

L'aspirateur de Valérie avale prestement les quelques biofilms poussiéreux à sa portée. Ce ne sont pas les seuls biofilms de la maison. Nous en côtoyons chaque jour. Nous les touchons (biofilms des surfaces), les respirons (biofilms des poussières) et les ingérons

(biofilms des aliments) sans même nous en rendre compte. La plupart sont invisibles, mais pas tous. Ils se révèlent le plus souvent à nous dans la salle de bains. Dès qu'il y a de l'humidité et des traces de nutriments, des microbes se multiplient et des biofilms se forment. Les traces noires des joints de salle de bains sont des biofilms fongiques. S'ils sont rose-orangé, ils contiennent probablement la bactérie *Serratia marcescens*.

Au laboratoire où je travaille, mes collègues et moi nous sommes amusés à faire des images, en microscopie électronique à balayage, de biofilms de notre environnement quotidien : poignée de porte,

De la poussière et des microbes

« Je vais vous démontrer, enfin, que c'est le mercure [*jouant le rôle de bouchon, donc ayant été au contact de l'air*] qui apporte dans les vases les germes, ou plutôt, pour que mon expression n'aille pas au-delà du fait démontré, les poussières qui sont en suspension dans l'air », annonça Pasteur lors d'une leçon à la Sorbonne en 1864. Il établit le transport des microbes par la poussière, et mit fin à la théorie de la génération spontanée selon laquelle des êtres vivants pouvaient apparaître à partir de matières inertes.

La contamination microbienne de l'air (jusqu'à 1 000 microbes par m^3) a ses avantages. Elle nous expose naturellement à la biodiversité microbienne, ce qui développerait nos défenses immunitaires. Elle est utilisée dans les fermentations alimentaires spontanées depuis très longtemps. Dans l'Égypte ancienne par exemple, les habitants laissaient sur le rebord des fenêtres des mélanges d'eau et de graines qui, contaminées par les levures de l'air ambiant, se transformaient en levains. À noter que cette contamination microbienne aérienne ne se limite pas à des déplacements de proximité de microbes bénéfiques ; des pathogènes peuvent aussi être transportés, parfois sur de très longues distances.

Pasteur a montré qu'avec l'altitude, la contamination microbienne de l'air diminuait. Selon lui, à 3 000 m, l'air aurait été pur. Il se trompait : 2,2 milliards de tonnes de poussières s'élèvent annuellement dans l'atmosphère ; elles charrient environ 10^{18} à 10^{19} bactéries, sur des milliers de kilomètres, et des spores (formes de résistance microbienne) vivantes ont été trouvées à plus de 40 km au-dessus du sol.

porte-savon, pierre ponce, rideau de douche, couvercle de poubelle, brosse à dents… De très belles images ont été obtenues, dévoilant non seulement les microbes, mais également la matrice protectrice qui les entoure. Certains biofilms sont composés d'une espèce très majoritaire, comme celui formé à proximité d'un robinet qui fuit, d'autres présentent des mélanges de bactéries et de moisissures, comme celui provenant de l'intérieur d'un jouet de bain pour enfant.

Louise chante dans la salle de bains. Valérie repassera donc pour essayer de faire un sort aux biofilms des joints. Si elle y parvient – la difficulté générale à les éliminer témoigne de la résistance des biofilms –, ils reviendront. C'est la cause (l'humidité) qu'il faut supprimer, et non les microbes, car c'est impossible. Les quelques biofilms de nos salles de bains ne sont pas problématiques, sauf d'un point de vue esthétique. Par contre, il faut agir lorsque les biofilms fongiques deviennent envahissants et couvrent une surface importante. À cause d'une infiltration d'eau, d'une condensation ou d'une aération insuffisante, une pièce peut devenir insalubre : les moisissures s'y développant produisent des toxines qui, inhalées régulièrement, peuvent entraîner des effets à long terme (cancers). L'exposition aux mycotoxines, qu'elle soit environnementale ou alimentaire, fait actuellement l'objet d'études et de surveillance.

La poussière à notre service

Valérie sourit : le ménage avance bien. Non, c'est pas vrai ! En repassant par le salon, elle s'aperçoit que Youpi est rentré subrepticement, laissant derrière lui poils et terre. Elle le récupère, le chasse, et s'empare à nouveau de l'aspirateur.

Si l'on remonte à la fin du XIXe siècle, les hygiénistes se battaient contre la boue et la poussière qui transportait *Mycobacterium tuberculosis*, bactérie responsable de la tuberculose. Les rues étaient alors

pour beaucoup en macadam (un agglomérat de pierres de différentes granulométries) qui produisait énormément de poussière, laquelle envahissait les maisons. Les rues étaient arrosées pour la faire tomber. C'était alors la boue qui rapportait les microbes dans la maison, notamment par l'intermédiaire des chaussures et des jupes — alors longues — des femmes. « Je suis convaincu qu'on arrivera à sauver bien des existences du jour où la jupe sera raccourcie d'une vingtaine de centimètres, au moins pour la rue », assurait un hygiéniste. La baisse de l'empoussiérage résultant du pavage des rues en pierre ou en bois a été bénéfique à la lutte contre la tuberculose, même si sa maîtrise est venue des antibiotiques et de la vaccination.

Rien à voir avec ces conditions d'hygiène, en ce qui concerne la maison de Valérie. Le volume de poussière n'est pas comparable, et la poussière en elle-même ne comporte pas que des inconvénients. Valérie devrait même remercier son chien, qui lui donne peut-être, indirectement, une occasion d'améliorer son humeur. La poussière et la terre transportent *Mycobacterium vaccae*. Cette bactérie active la libération de sérotonine et de dopamine, des neurotransmetteurs (messagers agissant au niveau des neurones) dont le déficit entraîne stress, anxiété et dépression. *Mycobacterium vaccae* a ainsi un effet antidépresseur.

Valérie note dans sa tête : faire attacher le chien. Il va être privé de maison pour le reste du week-end du fait de Julie, sa sœur. Cette jeune maman est persuadée que Youpi va donner de l'asthme à son fils Valentin. C'est un peu trop de précautions, pense quant à elle Valérie. Qui a raison, qui a tort ? Nos maisons sont réputées bien plus propres qu'autrefois, pourtant les allergies et l'atopie (prédisposition aux allergies courantes comme l'asthme, le rhume des foins et la dermatite atopique) progressent. Une augmentation de 40 % du nombre d'asthmatiques a été observée depuis vingt ans dans le monde. Les individus touchés vivent généralement dans des environnements peu biodiversifiés. Ces constats sont en lien avec

l'« hypothèse de la biodiversité », dite aussi « théorie hygiéniste ». Certains scientifiques placent en effet l'origine de ce phénomène dans le manque d'exposition des individus, pendant la prime enfance, aux microbes environnementaux, d'où une moindre stimulation des circuits de la réponse immunitaire, et des carences dans l'auto-immunité.

Penser avec son ventre

De nombreuses bactéries sont capables de sécréter des substances jouant le rôle de neurotransmetteurs. Certaines, comme *Mycobacterium vaccae*, viennent de l'environnement. D'autres appartiennent au microbiote intestinal : des *Lactobacillus* et des *Bifidobacterium* produisent de l'acide gamma-amino-butyrique (GABA), des *Escherichia* et des *Saccharomyces* de la noradrénaline, des *Escherichia* et des *Candida* de la sérotonine, etc.
Un déséquilibre du microbiote intestinal serait-il une des origines de la déprime ? Les études à ce sujet ne font que commencer. Néanmoins, quelques résultats sont déjà prometteurs. Notamment, des hommes et des femmes auxquels ont été administrés des *Lactobacillus* et/ou des *Bifidobacterium* ont montré moins de stress, d'émotion, de fatigue et d'anxiété. Remplacer les antidépresseurs ISRS (inhibiteurs sélectifs de la recapture de la sérotonine) par des laits fermentés, peut-être y viendra-t-on un jour, mais toujours sous contrôle médical.
L'axe « intestin-cerveau » est donc important. Des corrélations existent entre les perturbations du microbiote intestinal et des troubles comme l'anxiété et la dépression, mais aussi les troubles bipolaires, la schizophrénie, ou encore l'autisme. On ne sait pas quelle est la cause, quel est l'effet, ni même si la corrélation n'est pas simplement le fait du hasard. Les enjeux sont cependant suffisamment importants pour que les recherches continuent.

Cette éviction dans la prime enfance empêcherait donc le corps de s'adapter et imposerait de perpétuer l'éviction plus tard. Mais tout n'est bien sûr pas si simple... Par exemple, mon frère et moi avons été élevés ensemble. Enfants, nous avons fait des activités similaires. Nous avons donc dû rencontrer une biodiversité équivalente. Pourtant, mon frère est allergique et je le suis beaucoup moins.

Une cuisine impeccable

Valérie soupire. Sa mère, dans la cuisine, s'apprête à faire des confitures. Pas question, donc, de nettoyer pour le moment, mais ce n'est pas grave, elle le fait régulièrement.

Valérie a raison. La cuisine est un endroit à nettoyer régulièrement. C'est là où nous préparons les aliments, dont nous devons préserver l'innocuité, c'est-à-dire la propriété de l'aliment à ne pas entraîner d'intoxication alimentaire. Mais il est utopique, ici comme ailleurs, de viser un environnement stérile. Bien sûr, les publicités nous vantent les mérites de produits nettoyants (qui décrochent les souillures) tous plus efficaces les uns que les autres et, surtout, aux propriétés désinfectantes (qui tuent les microbes). La désinfection a toujours une efficacité limitée dans le temps. Quelques heures après l'application des produits, les surfaces retrouvent généralement leur niveau initial de contamination. De plus, leur utilisation trop fréquente et le non-respect de leurs conditions d'application peuvent entraîner l'apparition de résistances microbiennes.

L'utilisation de nettoyants-désinfectants n'a d'intérêt que pour des surfaces où ont été manipulés des aliments hypothétiquement contaminés (comme du poulet cru potentiellement contaminé par des salmonelles ou des *Campylobacter*) ou quand un membre de la famille est contagieux. Sinon, nettoyer-rincer-sécher suffit à maintenir les microbes des surfaces de la cuisine à des niveaux acceptables. Le nettoyage est primordial, c'est lui qui va enlever les souillures organiques dont se nourrissent les microbes. Il doit être effectué dès qu'un aliment se répand, que ce soit sur la table ou dans le frigo. Le séchage aussi est important car, privés d'eau, les microbes ne se multiplient pas.

Valérie jette un coup d'œil dans la cuisine. Tiens, sa mère remplace l'éponge. Elle ne doit pas lui convenir. Valérie se demande pourquoi. Changer très régulièrement l'éponge − ce vecteur de microbes − est

une bonne chose. On peut aussi la passer 1 à 2 min au micro-ondes à la puissance maximale : des études ont montré l'efficacité d'une telle procédure sur la destruction des microbes. De plus, il est important que l'éponge soit essorée pour sécher rapidement. Et bien sûr : à chaque pièce son éponge !

Outre les éponges, sur le podium des matériels contaminants d'une cuisine, on trouve les torchons et les planches à découper. Valérie lave ses torchons à 60, voire 90 °C, et il ne lui viendrait pas à l'esprit de les ranger sans les repasser. Pas de microbiologie derrière cela pour elle, mais le bonheur des piles bien alignées. Et pourtant, ce faisant, elle détruit les microbes à la chaleur. Le repassage durant 3 s à 120 °C en présence de vapeur (la chaleur humide est

« Tue 100 % des microbes »

« L'eau de Javel tue 100 % des microbes », « Une désinfection parfaite », « Une hygiène parfaite » : voilà quelques-unes des inscriptions que l'on peut lire sur les emballages des produits de nettoyage ou de désinfection. Mais que veulent-elles dire réellement ?

L'eau de Javel est un désinfectant très puissant. L'affirmation « tue 100 %… » signifie qu'aucune souche microbienne résistante à l'eau de Javel n'a été trouvée. Elle ne signifie pas que vous allez détruire, dans vos conditions d'utilisation, la totalité des microbes présents. En effet, l'efficacité de la désinfection dépend du temps d'application, de l'action mécanique appliquée, de la concentration en désinfectant et de la température de l'environnement : on désinfecte avec TACT (en prenant l'initiale de chacun des facteurs). En outre, la concentration d'eau de Javel étant instable une fois diluée, il est difficile de la connaître.

Le nombre de microbes initiaux influence aussi le nombre de microbes résiduels après une destruction (qu'elle soit chimique ou thermique). On détruit 99 %, 99,99 %… de microbes. Plus il y en a au départ, plus il en reste à la fin, et il est donc important de ne pas les laisser se multiplier.

Florence Dubois-Brissonnet, professeure en microbiologie et sécurité sanitaire des aliments, rapporte que, même dans les unités de production des industries alimentaires, « une surface nettoyée et désinfectée n'est pas une surface stérile, mais une surface dont la contamination est compatible avec la production sans danger d'un aliment ».

plus efficace pour tuer les microbes que la chaleur sèche) détruit 100 000 cellules d'*Escherichia coli* ou de *Staphylococcus*.

Restent les planches à découper. On les choisit en bois, en plastique ou en verre ? Chez les scientifiques, les avis divergent. Les planches en bois ont été un temps bannies pour leur faible « nettoyabilité » ; elles regagnent du galon du fait des propriétés antimicrobiennes maintenant reconnues au bois. Il y a du « pour » et du « contre » dans le plastique et dans le bois. Ces matériaux ont en commun l'existence de rayures qui piègent les microbes d'un aliment pour éventuellement les transférer à un autre. Dans ce contexte, les planches les plus hygiéniques sont en verre. Non rayables ! Mais elles usent les couteaux.

Dans sa fiche *Hygiène dans la cuisine, 10 recommandations pour éviter les intoxications alimentaires*, l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses) ne tranche pas sur la nature de la planche à découper, mais elle préconise « une planche pour la viande et les poissons crus, une autre pour les produits cuits et les légumes propres ». Car le cru et le cuit ne font pas bon ménage : le cuit décontaminé par la cuisson ne doit pas être recontaminé par le cru ! Cela est valable pour les planches à découper, mais aussi pour les plats, les ustensiles employés pour manipuler et transporter les aliments. C'est aussi vrai dans notre frigo, où les aliments cuits doivent être stockés séparés des crus. Appliquons-nous toujours cette règle toute simple ?

Du linge plus blanc que blanc

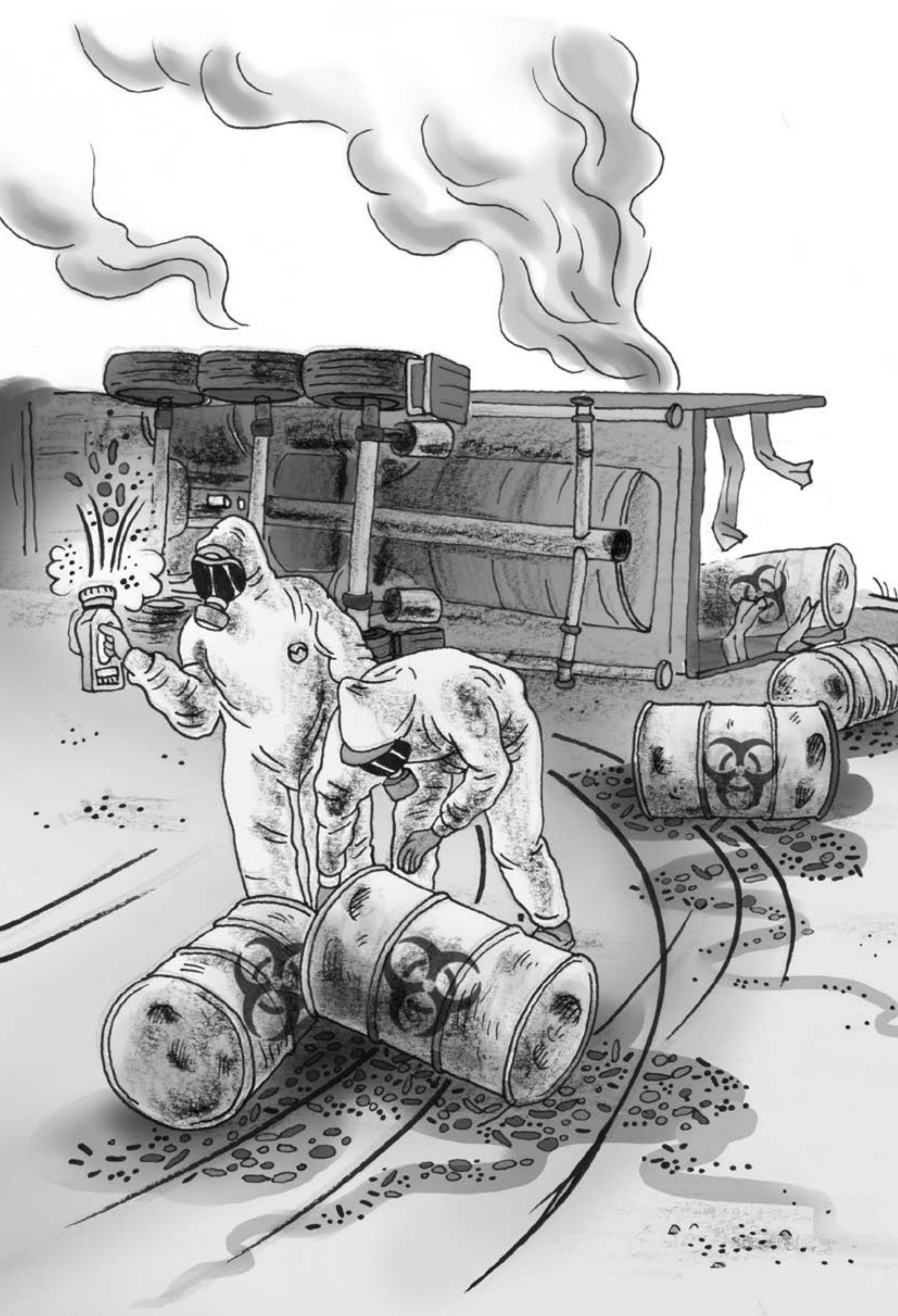
Dernière tâche pour Valérie. Elle passe de chambre en chambre et collecte le linge sale. La couleur d'un côté, le foncé de l'autre. Elle « lance » une machine de « foncé », au cycle rapide 30 °C. C'est une habitude qu'elle a prise pour mettre sa petite pierre à l'édifice de la protection environnementale. Elle économise ainsi de l'eau et de l'énergie (jusqu'à 25 % par cycle).

Sans chercher à avoir un linge stérile, le lavage est un bon moyen d'y maintenir des concentrations microbiennes acceptables en éliminant une partie des microorganismes qu'on y trouve : des *Staphylococcus*, des spores de *Bacillus*, des virus, des bactéries fécales comme *Escherichia coli*, en provenance directe de nos microbiotes cutané et intestinal, et de notre environnement.

Quand on sait que l'efficacité de la destruction par la chaleur est fonction du temps et de la température, on peut se poser la question du risque sanitaire engendré par l'utilisation de plus en plus fréquente des programmes courts et basse température. Bonne nouvelle, elle ne pose pas de problème particulier pour du linge « normalement » contaminé appartenant à des adultes en bonne santé. En cas de personnes sensibles (enfant en bas âge, personne immunodéprimée) ou de situation particulière (maladies), il est préférable de procéder à un lavage à 60 °C, éventuellement à 40 °C. Dans ce dernier cas, il faut utiliser un détergent contenant un agent de blanchiment oxygéné ; le percarbonate de sodium, par exemple, permet la production d'acide peracétique, un désinfectant efficace.

D'autres actions toutes simples complètent ces procédures pour obtenir du linge sain : limiter le temps où le linge reste mouillé, que ce soit avant ou après séchage, pour éviter la multiplication possible des microbes ; se laver les mains avant d'étendre le linge afin d'éviter une recontamination ; le trier en cas de maladie ou de personnes fragiles (bébé) avant de le laver, afin d'empêcher une contamination de linge à linge. Enfin, pour le linge « sensible », le repasser pour détruire les microbes. Nous repassons tous de moins en moins ; je continue à le faire pour les torchons et les serviettes. Et je repassais aussi avec un réel plaisir les bodies et autres grenouillères de mes enfants… il y a quelques années.

Valérie esquisse deux pas de danse. Sa maison resplendit, avec juste ce qu'il faut de microbes, prête pour la fête !



3
ANTOINE, LE PÈRE POLICIER

Où l'on découvre que les milieux gardent les traces microbiennes des êtres vivants qui les ont fréquentés et que le microbiote peut aider à résoudre des crimes. Où l'on évoque la surveillance de maladies disparues et la lutte contre le bioterrorisme. Où la microbiologie rencontre le côté noir de l'être humain…



Antoine, policier dans la police scientifique, est le père de Louise. Il saute du lit à 6 heures tous les jours. Se rase d'un geste rapide et précis. S'habille promptement. Déjeune sur le pouce. Le voilà prêt pour son jogging quotidien. Il sort doucement, toute la maisonnée dort encore.

Nous retrouvons Antoine à 10 heures, dans la cuisine, en train de se désaltérer. Il pose le verre où il vient de boire. Des traces de doigts, aux empreintes digitales bien visibles, lui remémorent son travail.

Des microbes et des indices

Antoine est chimiste et suit actuellement une formation en microbiologie. Car il sent que la police scientifique va se servir des microbes à l'avenir. Des signatures autres que les empreintes digitales et l'ADN sont à l'étude pour retrouver les responsables d'actes malveillants. Certaines découlent des découvertes récentes sur nos mélanges microbiens (microbiotes) cutanés.

Revenons sur quelques informations données au chapitre 1. Nos microbes cutanés sont, avec notre génome, responsables de l'odeur dite « primaire » qui nous caractérise. Elle est partiellement masquée par les savons et autres produits cosmétiques, mais l'odeur secondaire alors dégagée est aussi une source non négligeable d'indices. Un coupable ne pourrait-il pas être démasqué par son odeur ? Les chiens savent suivre les odeurs. Les chimistes peuvent les analyser, au moins partiellement. Mais comment les récolter ? Une « éponge piège odeur », sélectionnée dans le cadre de l'appel à projets « attentats-recherche » du CNRS, est actuellement testée par des collègues militaires d'Antoine. Pour la fabriquer, des huiles végétales sont gélifiées en présence de cristaux de sucre, lesquels sont ensuite simplement dissous dans de l'eau. On obtient un « organogel » microporeux lipidique dans lequel les molécules odorantes, fixées, se solubilisent. Une « mini-éponge » de la taille d'une pièce de monnaie aurait ainsi, si on la déployait, une surface de contact et de capture aussi grande qu'un cours de tennis ! À quand l'utilisation de cette

« éponge » ? Les chercheurs estiment que trois ans de mise au point sont encore nécessaires.

Le nuage de microbes émis dans l'air, différent d'une personne à l'autre, est déjà potentiellement une source d'indices : l'analyse par des techniques génétiques du nuage microbien laissé dans une chambre permet de remonter, en moins de quatre heures, jusqu'à l'occupant de cette chambre si elle est au départ… stérile. On est pour le moment loin d'identifier un suspect qui aurait transité sur le lieu d'un crime. Le nuage de microbes humains se mélange aux microbes environnementaux et disparaît avec le temps ; les technologies de demain permettront peut-être de l'exploiter davantage.

Une carte d'identité microbienne

L'identité d'un microbe est définie par son genre (*Clostridium* par exemple) et son espèce (*botulinum* ou *perfringens*). Le sérotype (antigènes constitutifs) et le toxinotype (toxines produites) sont des caractéristiques supplémentaires. Connaître l'identité d'un microbe permet de présupposer ses caractéristiques de développement et de survie dans l'environnement, de résistance aux traitements de destruction, et de pathogénie. Le typage (étude de marqueurs particuliers) aide à déterminer un lien de parenté entre différents microbes ; il est utilisé pour identifier la source d'une contamination.

L'identification microbienne est donc très utile. Comment la réalise-t-on ?

Les microbes en milieu liquide sont analysés directement, par exemple pour connaître la contamination microbienne d'une eau de rivière ou d'un jus de fruit. Ceux des autres environnements doivent être récupérés. Un écouvillon semblable à un coton-tige frotté sur une surface permet d'en prélever les microbes, puis de les mettre en suspension dans un milieu liquide pour analyse. Autre méthode de récupération : un milieu gélifié nutritif — ou gélose — appliqué directement sur la surface. Quant à l'air, des « biocollecteurs » l'aspirent et l'envoient dans des liquides ou sur des géloses où les microbes sont transférés.

Vient ensuite l'identification proprement dite. Elle est de plus en plus basée sur la biologie moléculaire, laquelle permet des diagnostics rapides et précis dans les domaines militaire, médical et alimentaire. En métagénomique, l'utilisation du séquençage haut débit permet notamment l'analyse d'échantillons contenant des mélanges complexes d'ADN ou d'ARN microbiens.

Utiliser l'« empreinte » des microbes de nos mains constitue sans doute une méthode plus prochainement applicable. On transporte tous de l'ordre de 10^7 bactéries par cm^2 sur nos mains. Elles appartiennent à plus de 150 espèces différentes, dont moins de 15 % sont communes entre deux individus. Ces microbes se transfèrent aux surfaces touchées, où ils survivent plusieurs semaines. Partant de l'analyse de la flore bactérienne d'une souris d'ordinateur, des chercheurs américains sont remontés à la main qui l'avait déplacée, parmi plusieurs centaines d'autres. L'intérêt de cette méthode résiderait dans les « empreintes » microbiennes laissées sur des surfaces comme des tissus, qui ne révèlent habituellement pas les empreintes digitales.

Par ailleurs, l'utilisation d'empreintes, qu'elles soient digitales, microbiennes, ou génétiques, nécessite la constitution de bases de données stockant les informations. De tels fichiers posent donc notamment la question de la liberté individuelle. Affaire à suivre.

Les microbes pourraient également aider Antoine et ses collègues à dater les crimes. On a tous entendu parler de rigidité cadavérique. Peut-être connaissez-vous aussi l'entomologie médico-légale ? Cette science étudie les liens existant entre les insectes trouvés sur un cadavre et son état de décomposition. Dans le même esprit, pourquoi ne pas utiliser les microbes, toujours présents sur et dans l'homme, qu'il soit vivant ou mort ? C'est ce qu'a dû penser l'Institut national de la justice américaine qui, en 2014, a financé des études sur le comportement des bactéries dans un corps en décomposition. Le verdict est tombé : les microbes permettent une datation de l'heure de la mort aussi précise que celle résultant de l'entomologie, et moins dépendante de l'environnement. Que de possibilités ! Antoine n'a pas tort. Les microbes deviendront sûrement des aides-policiers.

L'arme du pauvre

Antoine s'essuie les mains, reprend son verre et boit. Un goût prononcé d'eau de Javel lui emplit la bouche et le travail lui revient en tête. Décidément, il lui est bien difficile de se détendre !

On a tous déjà perçu ce goût de Javel, à certains moments plus qu'à d'autres. Il est une conséquence du plan Pirate-NRBC (nucléaire, radiologique, biologique et chimique), une extension du plan Vigipirate qui prévoit une augmentation de la chloration de l'eau potable pour lutter contre une éventuelle contamination par des agents biologiques.

Le premier plan Pirate-NRBC (alors nommé Biotox-Piratox-Piratome) date de 2001, année charnière dans l'histoire du terrorisme moderne. Le 11 septembre 2001 s'écroulaient les tours jumelles de New York, frappées par des avions d'Al-Qaïda. Une semaine plus tard débutait l'affaire des lettres contaminées par la bactérie potentiellement mortelle du charbon, *Bacillus anthracis*. Ces lettres contaminées ont causé la mort de cinq personnes, ainsi

Les plans anti-bioterrorisme

Le plan Vigipirate est probablement le plan antiterrorisme le plus connu en France. Il vient d'une instruction ministérielle sans nom qui, en 1978, organise un système d'alerte, puis devient le plan intergouvernemental Pirate, et maintenant Vigipirate. Il n'a, depuis, cessé d'évoluer pour s'adapter aux menaces. Dans sa forme actuelle, il comporte trois niveaux d'alerte : Vigilance, Sécurité renforcée-risque attentat, et Urgence attentat. Début 2018, nous sommes au niveau Sécurité renforcée du plan Vigipirate. Comment va-t-il évoluer ?

Un volet du plan spécifique Pirate-NRBC est dédié à la lutte contre le bioterrorisme. Ce dernier comporte un axe de prévention, un de veille et alerte sanitaires, et un troisième de gestion de crise. Essentiels dans les deux premiers axes, les laboratoires du réseau Biotox analysent des échantillons biologiques sur l'ensemble du territoire français, prêts à donner l'alerte à la moindre analyse suspecte. La communication autour des actes bioterroristes fait partie du dernier axe. Elle est aussi primordiale que les autres actions, notamment pour éviter toute psychose qui pourrait être la conséquence la plus problématique d'un attentat à l'arme biologique.

Les plans « variole » et « PCT » (pour les trois maladies infectieuses peste, charbon et tularémie) sont d'autres plans de lutte contre le bioterrorisme. Ils ciblent les microbes responsables de ces maladies, lesquels sont actuellement considérés parmi les plus à risque bioterroriste.

qu'une désorganisation et une psychose collective. Dix mille personnes ont été traitées à titre préventif. Quant au coût : des dizaines de milliards de dollars ! Tout cela dû, selon le FBI, à un chercheur voulant financer le développement d'un vaccin anticharbon qu'il avait mis au point. Bien que n'étant pas le fait d'une organisation terroriste, cet événement a placé le monde face à l'existence d'un risque biologique intentionnel. Il a fait réfléchir la communauté internationale sur la mise en place d'actions antibioterroristes toujours d'actualité.

L'année 2001 l'a rappelé, l'arme biologique existe. Mais, depuis l'entrée en vigueur, en 1975, de la Convention sur les armes biologiques ou à toxines (CABT), elle est interdite dans un cadre étatique. Son utilisation est donc synonyme d'acte de bioterrorisme, et cette « arme du pauvre » a peu de chances d'être efficace à grande échelle. Des recherches sur les agents du risque biologique persistent néanmoins dans les domaines civil et militaire. Leurs buts : connaître pour anticiper, maîtriser, et soigner, le cas échéant.

Des films catastrophes aux scénarios improbables

Antoine est désaltéré. Il voudrait bien prendre une douche, mais la salle de bains est occupée. Pour patienter, il se plonge dans la lecture de ce qui lui tombe sous la main : le programme télé. Son esprit toujours à l'affût est attiré par le titre d'un film prochainement diffusé : *Contagion*. Il survole le résumé : « Une pandémie dévastatrice explose à l'échelle du globe. Au Centre de contrôle des maladies, des équipes se mobilisent pour tenter de décrypter le génome du mystérieux virus, qui ne cesse de muter. »

Ils sont nombreux, ces films décrivant des pandémies aux origines diverses. Mais peu évoquent le bioterrorisme. Dans *Contagion*, cette hypothèse est rapidement écartée. D'ailleurs, les actes de bioterrorisme moderne restent limités : l'attentat par les enveloppes contaminées de 2001 et les tentatives de la secte Aum Shinrikyo dans les années 1990-1995 sont les plus retentissants. Ces dernières, qui impliquaient

le bacille du charbon et les toxines botuliques, ont toutes échoué. Les films catastrophes trouvent un écho dans la réalité, mais ils ne sont pas entièrement réalistes. Même si, dans *Contagion*, le virus incriminé peut faire penser au virus Nipah, du fait d'une transmission animal-animal-homme comme origine de la pandémie, le supermicrobe superlétal supermutant — souvent un supervirus — imaginé n'existe pas. Heureusement pour nous.

En 1949, le bactériologiste Theodor Rosebury a défini des critères permettant de déterminer si un microbe pouvait être une bonne arme biologique. Ces critères sont aujourd'hui utilisés pour sélectionner les agents à surveiller vis-à-vis du risque bioterroriste. Plusieurs listes désignent les plus problématiques. Elles émanent du groupe Australie — du nom du pays qui les a instaurées — et du Centre de contrôle des maladies américain, le CDC. En France, les microbes et les toxines dont l'emploi serait à risque pour la santé publique sont répertoriés dans un arrêté du 30 avril 2012.

Ces listes contiennent des bactéries, des virus, des champignons microscopiques de classe 3 ou 4, ainsi que des toxines microbiennes. Les classes microbiennes reflètent un risque croissant de 1 à 4, en fonction de la possibilité, pour le microbe, d'engendrer une maladie chez l'homme (ce qu'on appelle la pathogénie du microbe), de se disséminer dans l'environnement, et de l'existence de moyens de prophylaxie (qui empêchent la survenue de la maladie, comme les vaccins) ou thérapeutiques (qui guérissent, comme les antibiotiques et les antiviraux). Toutes les listes pointent en particulier les microbes des plans « variole » et « PCT » : le virus de la variole et les bactéries *Yersinia pestis*, *Bacillus anthracis* et *Francisella tularensis*. Cette dernière est moins connue que les autres. Elle aurait été à l'origine de grandes épidémies, il y a très longtemps, notamment au XIVe siècle avant J.-C. où, utilisée comme une arme biologique, elle n'aurait pas été maîtrisée. La possibilité d'une dispersion aérienne de *Francisella tularensis*, d'une contamination humaine par inhalation, et la

sévérité des formes pulmonaires et septiques de la tularémie font néanmoins de cette bactérie un agent potentiel du risque biologique. On estime en effet que la dispersion de 50 kg d'un aérosol de *Francisella tularensis* sur une métropole de 5 millions d'habitants disposant de 10 000 médecins et de 65 000 lits d'hospitalisation conduirait à 250 000 cas de maladies incapacitantes et 19 000 morts.

Microbes sous haute surveillance

À la lecture du résumé de *Contagion*, Antoine soupire. Les scénaristes ne manquent pas d'imagination et, pour eux, le pire est presque sûr. Quand il pense à toutes ces formations qu'il a suivies pour être rapidement opérationnel en cas d'attaque bioterroriste, il se dit que cela vaudrait bien un film. Un film anti-catastrophe.

Après 2001, la prise en compte par les États du risque bioterroriste s'est amplifiée. Un livre vert (rapport officiel et base de discussion pour la mise en place d'une politique) a été élaboré par l'Union européenne sur la préparation à la menace biologique. Il conseille la coopération internationale et le développement des outils de détection des agents du risque, de surveillance et d'alerte. Aujourd'hui, des kits permettent la détection en moins de 30 min des microbes et des toxines à risque. En France, des réseaux de laboratoires ont aussi été mis en place pour analyser rapidement les produits suspects. Des stocks de traitements préventifs et curatifs contre la peste, la tularémie et le charbon ont été constitués dans des hôpitaux de référence. Les études se poursuivent sur les vaccins contre la variole pour en diminuer les effets secondaires. Les praticiens hospitaliers ont été formés, les médecins libéraux sensibilisés. Enfin, des exercices sont régulièrement organisés pour tester et actualiser les stratégies de lutte contre un acte bioterroriste.

Reconnaître rapidement un acte bioterroriste, lutter efficacement contre ses conséquences, c'est primordial. Mais quelles mesures sont

mises en place pour éviter la survenue d'un tel acte ? L'emploi, le transport, l'achat des microbes à risque sont soumis à une autorisation de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé (ANSM). Les laboratoires sont sécurisés pour éviter la diffusion inopinée de souches microbiennes. Le transfert transfrontalier des cultures microbiennes est contrôlé. Ce qui d'ailleurs rend parfois difficile même l'échange de souches non pathogènes avec des collègues européens ! Cependant, au vu des enjeux, les contraintes paraissent bien faibles !

Les microbes sont surveillés. Les hommes aussi. En matière de bioterrorisme, l'ingérence est de mise. Une enquête de moralité est menée sur les personnes susceptibles de travailler sur des souches hautement pathogènes. Toute addiction — drogue, alcool, jeu — est traquée. Même Facebook et les autres réseaux sociaux sont vus d'un mauvais œil. En résumé, tout ce qui peut être à l'origine de pressions est à prohiber.

Des laboratoires haute sécurité

Pour manipuler les agents du risque biologique, des laboratoires ultra-sécurisés sont nécessaires. Les maîtres-mots de ces labos L3+ et L4 (dits aussi P3+ et P4) : isolement et surveillance. Les scientifiques y portent des combinaisons en surpression isolantes, l'air y est filtré, les portes sont des sas — de plus en plus de sas au fur et à mesure que l'on monte en dangerosité. Entrer et sortir des zones P4 est un parcours du combattant incluant des douches désinfectantes. Dans cet environnement ultra-isolé, le travailleur seul n'existe pas. Les hommes en scaphandre communiquent sans cesse avec le poste de sécurité où les surveillent des collègues habilités à intervenir.
On trouve trois labos P4 en France : le P4 Jean-Mérieux de l'Inserm, à Lyon, dédié aux recherches civiles, au diagnostic et à la gestion des collections ; celui de la Délégation générale de l'armement (DGA) à Vert-le-Petit, dans l'Essonne, pour les activités militaires de connaissance du risque, de caractérisation et d'essais des équipements de protection contre la menace biologique ; celui du Service de santé des armées (SSA) à Brétigny-sur-Orge, toujours dans l'Essonne, réservé à la mise au point de prophylaxies et de thérapies.

Peut-on définitivement vaincre les microbes ?

Antoine se dit qu'un film anti-catastrophe pourrait se baser sur la variole, cette maladie aujourd'hui inexistante, et pourtant toujours sous surveillance. Il réunirait tous les ingrédients : un virus mortel dans 30 % des cas, qui a été utilisé par le passé comme arme offensive par des États, et que la coopération internationale a réussi à faire disparaître.

Je suis vaccinée contre le virus de la variole. Mes enfants ne le sont pas. En effet, fin 1979, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) a déclaré l'éradication de cette maladie à l'échelle de la planète, et la vaccination antivariolique a alors cessé d'être pratiquée en France. Petit retour sur cette victoire.

En 1967, l'Assemblée mondiale de la santé alloue un budget annuel de 2,4 millions de dollars à l'OMS pour conduire une

Quand le dégel s'amorce…

Le *permafrost*, ou pergélisol en français, est un sol congelé, exposé à une température inférieure à 0 °C pendant au moins deux ans. Selon certaines prévisions, 40 % de la surface du *permafrost* disparaîtront si la température mondiale augmente de 2 °C (l'Accord de Paris de 2015 fixe comme objectif de maintenir le réchauffement climatique par rapport à l'ère préindustrielle en dessous de cette valeur critique). Les conséquences seraient alors multiples, à commencer par une biodégradation de la matière organique jusque-là piégée dans le *permafrost*, qui produirait des gaz à effet de serre (CO_2 et méthane). Le *permafrost* est également un immense congélateur où sont conservés, parfois depuis des millénaires, des microbes toujours capables de redevenir actifs. Ainsi, en 2015, le virus géant *Mollivirus sibericum* a été « ressuscité » à partir d'un échantillon de *permafrost* sibérien. Il avait hiberné 30 000 ans ! Ce contemporain de l'homme de Néandertal est ainsi réapparu sur terre. Le dégel du *permafrost* pourrait entraîner la revivification de microbes que l'on croyait disparus ou maîtrisés. C'est déjà d'actualité avec *Bacillus anthracis*. En juillet 2016, dans le Grand Nord russe, un enfant mourait de la maladie du charbon, 23 personnes étaient contaminées, ainsi que plus de 2 000 rennes. L'origine de cette épidémie a été attribuée à la décongélation d'un renne mort du charbon depuis plusieurs dizaines d'années. Un tel phénomène pourrait bien se produire avec d'autres bactéries ou virus. Les régions du *permafrost* n'ont pas été épargnées par la variole, et l'on peut imaginer une résurgence de son virus.

campagne visant à éliminer la maladie sur une décennie. En octobre 1977, le dernier cas mondial de variole naturelle est observé, en Somalie. Mais, après la transmission aérienne d'un virus de la variole hors du laboratoire où il était manipulé, des cas se produisent encore en Angleterre en septembre 1978. Ce seront les derniers. L'OMS décide alors de procéder à la destruction de la majeure partie des stocks de virus vivants de la variole. Les derniers stocks sont conservés dans deux laboratoires P4 : celui du CDC à Atlanta, aux États-Unis, et celui du Centre national de recherche de virologie et de biotechnologie à Novossibirsk, en Russie.

Ces stocks doivent-ils être détruits ? Les autorités se sont posé la question en 1993, 1995, 1999, 2002… Elles le referont en 2019, lors de la 72e Assemblée mondiale de la santé. Ce qui fait actuellement hésiter les États membres, c'est la possibilité — montrée avec des souches de variole animale — de créer, par biologie de synthèse, des virus varioliques à partir d'informations publiques. Qui dit que des esprits mal intentionnés ne remettront pas ainsi en circulation un virus de la variole humaine ? Et ne peut-on pas également craindre la réémergence de ce virus par décongélation du *permafrost* ? Cela oblige à évaluer encore une fois les besoins de recherche sur des virus de la variole vivants. Garder des exemplaires du virus, c'est conserver une longueur d'avance.

Continuer à conserver le virus de la variole relève du principe de précaution. D'abord édicté dans le cadre de la préservation de l'environnement, ce principe s'est étendu à de nombreux domaines. Il consiste à prendre, à titre préventif, des mesures pour empêcher la survenue d'un danger, avant même de savoir avec certitude si la menace est effective. La question est ouverte sur l'utilité du principe de précaution : l'argent dépensé dans la lutte contre le bioterrorisme ne serait-il pas mieux employé ailleurs ? L'exemple de la maîtrise de la variole et de son virus apporte un élément de réponse.

Antoine se secoue. Une bonne douche pour se laver le corps et l'esprit. Ensuite il ne pensera plus qu'à la fête de Louise. Promis, juré.


Groseilles
2018
[-)

4
EUGÉNIE, LA GRAND-MÈRE CUISINIÈRE

Où l'on revient sur les bases scientifiques de la conservation des aliments et l'on comprend pourquoi il est important de suivre une recette. Où l'on explique comment la sécurité des aliments est surveillée par les professionnels de l'agroalimentaire et des réseaux de biologistes. Où l'on apprend quels principes à appliquer chez soi permettent de limiter les risques microbiologiques.



Eugénie est la grand-mère maternelle de Louise. Tous l'appellent Nini. Les cheveux courts pour faire moderne, elle a son petit caractère et sait se faire respecter. On la retrouve à 10 heures, préparant des confitures de groseilles. Sa fille Valérie lui a dit que cela pouvait attendre. Attendre ! Ce n'est pas le jour de la fête de Louise qu'elle fera des confitures ! Et ensuite, les groseilles seront passées.

Eugénie imagine déjà l'odeur des confitures. Pour elle, cuisiner, c'est transmettre l'amour. Mais sait-elle que ses gestes ancestraux sont garants de la saveur, et aussi de l'innocuité des aliments ?

Pourquoi stabiliser et conserver les aliments ?

Lorsque Eugénie transforme des groseilles en confiture, un aliment microbiologiquement stable se conservant dans le temps, elle permet à toute la famille de consommer des fruits estivaux en plein cœur de l'hiver.

Un aliment peut être stable parce que sa composition empêche le développement des microbes. Le sel (produits de salaison : viande ou poisson salés, olives en saumure), le sucre (confitures, pâtes de fruits, sirops), les conservateurs (nitrites dans le jambon, propionate dans le pain de mie) et les pH acides (fruits, vinaigre) sont stabilisateurs. Tout comme l'absence d'eau (fruits secs, biscuits). Bien entendu, tout est une question de dose : par exemple, un citron au pH de 2 est plus stable que du raisin au pH de 4. Comme la salaison et le séchage, la réfrigération, la congélation et l'acidification ne font que stopper le développement des microbes, qui se retrouvent en état de survie.

Les aliments en conserve sont également stables du fait de la destruction des microbes par la chaleur et de l'emballage étanche empêchant toute contamination ultérieure. La chaleur, souvent appliquée entre 110 et 120 °C, est le meilleur moyen de détruire l'intégralité des microbes. D'autres méthodes sont utilisées (rayonnements pour les herbes surgelées et les épices, hautes pressions pour le jambon et les jus de fruits) ou à l'essai (lumière pulsée, plasma…),

mais, dans leurs conditions d'application, elles ne détruisent pas les spores, formes de résistance des bactéries.

Pour prolonger la durée de vie des aliments périssables (viande, poisson, produits laitiers et, de façon moindre, légumes et fruits), il est possible de jouer sur leur température de conservation en les réfrigérant ou en les congelant. De plus, la conservation est souvent basée sur plusieurs principes. Prenons le cas d'un jambon cuit : la cuisson détruit la plupart des microbes présents dans la matière première ; l'utilisation de nitrites permet la maîtrise de *Clostridium botulinum* (dont les spores ne sont pas détruites par la cuisson) ; la réfrigération limite le développement des microbes qui auraient contaminé le jambon lors d'étapes postérieures à la cuisson (tranchage, par exemple).

Stables ou périssables, les aliments sont consommables, sous réserve qu'ils ne présentent pas d'altérations perceptibles et qu'ils aient été

Maîtriser les microbes… sans les connaître

Nicolas Appert, à la fin du XVIIIe-début du XIXe siècle, enferme des légumes dans des bouteilles étanches, qu'il plonge dans l'eau bouillante. Après plusieurs mois à température ambiante, les légumes restent consommables. Il publie *Le livre de tous les ménages, ou l'art de conserver pendant plusieurs années toutes les substances animales ou végétales*, et reçoit des Anglais le titre honorifique de « bienfaiteur de l'humanité ».

Appert cherchait à éliminer le pourrissement des légumes et l'altération du goût. Il y est parvenu. À propos de cette découverte, le gastronome Grimod de La Reynière écrivit poétiquement dans un de ses *Almanach des gourmands* (publiés de 1803 à 1812) : « On naturalise le printemps et l'été, au milieu du plus rigoureux hiver. »

Appert ne tentait pas de maîtriser les microbes. Il ne les « connaissait » même pas. Pasteur ne les « découvrit » qu'un demi-siècle plus tard. Chacun de ces grands hommes laissa son nom à un traitement thermique. L'appertisation permet d'obtenir des produits stériles, dans lesquels tous les microbes ont été tués, y compris les bactéries présentes sous forme de spores thermorésistantes. La pasteurisation (traitement thermique à des températures inférieures à 100 °C) ne détruit pas ces spores et les produits pasteurisés sont à conserver au frais.

conservés dans les bonnes conditions, celles indiquées sur les étiquettes, le cas échéant. Par contre, il ne faut pas consommer les produits altérés. C'est évident pour de la viande avariée, du poisson odorant, du lait tourné, du jambon rendu fluorescent par *Pseudomonas fluorescens*. On jette aussi les conserves bombées. Le gonflement est un signe d'alerte : ces conserves n'ont pas été stérilisées correctement.

Et les aliments altérés par des moisissures ? Pendant longtemps, j'ai enlevé la couche supérieure des confitures moisies, et je consommais la partie non altérée. Maintenant, je jette le tout. Par principe de précaution. En effet, des moisissures peuvent produire des toxines. Les épidémies mortelles de « feu de Saint-Antoine », au Moyen Âge, étaient dues à la consommation de farines de seigle fortement contaminées par des mycotoxines. Ces intoxications aiguës et massives ne sont plus à craindre de nos jours chez nous, du fait des contrôles sanitaires mis en place. Mais les conséquences à long terme (cancer notamment) d'une exposition répétée à des doses, même petites, de mycotoxines posent question. Les études sont en cours. Pour les produits industriels, les mesures de maîtrise (surveillance, prévention de la contamination dès la production, décontamination des aliments) ont été accentuées. Notamment, depuis 2006, la réglementation fixe des valeurs seuils pour les mycotoxines les plus préoccupantes. Il vaut donc mieux jeter les aliments moisis. Mais on peut continuer à manger du camembert, dont la croûte est formée par *Penicillium camembertii*. Les moisissures sélectionnées pour transformer les aliments sont sans danger.

Sans eau, pas de vie !

Comme toute cuisinière organisée, Eugénie commence par rassembler ses ingrédients. Les groseilles sont là, lavées. Elle a besoin de sucre. Elle ouvre l'armoire de la cuisine servant de garde-manger, et admire le rangement. À un étage, tout pour le petit-déjeuner : biscottes, café, chocolat, thé et sucre. Au-dessus, les biscuits

rivalisent avec les pruneaux et les abricots secs. Enfin, tout en haut, thon en boîte et autres conserves permettraient à la famille de tenir aisément un mois en totale autonomie. Eugénie sourit en voyant, soigneusement emballée, la viande séchée et salée, en provenance directe de son saloir.

Tous ces aliments stockés à température ambiante sont des produits stables. Le séchage de la viande dans les règles de l'art en élimine l'eau. Tout comme la cuisson pendant la fabrication des biscuits et des biscottes. Et sans eau, pas de multiplication microbienne. C'est également la privation d'eau qui stabilise les confits, les confitures, les pruneaux, la viande salée, en liant les molécules d'eau au sucre ou au sel. L'eau n'est alors plus disponible pour le métabolisme (réactions chimiques permettant la vie) microbien. Pour les microbes, le salé c'est donc comme le sucré. Et l'on pourrait très bien imaginer conserver nos groseilles au sel, comme des cornichons ! On le fait bien pour des citrons confits, alors qu'ils ne sont généralement pas associés à un goût salé.

« Plus il y a d'eau, plus les microbes se développent ? », peut-on se demander. Oui et non. Ce qui importe, ce n'est pas tant la teneur en eau, mais sa disponibilité, laquelle se quantifie par la mesure de l'activité de l'eau, ou a_w (pour l'anglais *activity of water*). Néanmoins, pour un produit donné, plus il y a d'eau, plus l'a_w est élevée. Et nous avons alors notre rôle à jouer dans la stabilité des aliments à a_w réduite, en les « conservant dans un endroit sec et frais », comme on le lit sur leur emballage, et en refermant après ouverture cet emballage optimisé pour limiter la reprise en eau. En effet, une réhydratation trop importante peut relancer la multiplication de microbes jusque-là en état de survie, même si certains produits industriels à a_w réduite contiennent aussi des conservateurs (sulfites dans les fruits déshydratés, par exemple).

Une reprise de la multiplication microbienne peut aussi se produire lors du mélange de produits à a_w réduite avec des aliments humides. Les épices, souvent contaminées, peuvent être critiques

dans ce contexte. En 2003, aux États-Unis, 272 personnes ont été intoxiquées et 640 000 kg de produits divers ont été rappelés parce qu'ils étaient contaminés par des salmonelles. C'étaient principalement des sandwiches contenant du salami. Et c'est le poivre du salami qui était à l'origine de la contamination. Une réfrigération efficace aurait empêché ce phénomène.

Refroidir pour endormir

Antoine, le mari de Valérie, a rejoint sa belle-mère dans la cuisine. Il se désaltère et lui propose un café. Elle sort une bouteille entamée du frigo pour son nuage de lait. En prévision de la fête du lendemain, ce frigo est rempli de denrées toutes plus appétissantes les unes que les autres : des bouchées salées, du saumon fumé sous vide, des terrines, de la mayonnaise et, Louise étant fan du Japon, des sushis et des sashimis (tranches de poisson cru). Enfin, des salades conditionnées sous atmosphère protectrice.

Tout est bien séparé dans de petites boîtes. Le cuit est séparé du cru pour éviter les contaminations croisées. Aucun suremballage (ces cartons qui regroupent par exemple plusieurs yaourts sont particulièrement vecteurs de microbes). Eugénie se demande si elle pourra loger au frais le gâteau qu'elle doit faire après les confitures. L'organisation du frigo la rassure. Elle trouvera de la place.

Les aliments contenus dans ce frigo ne sont pas suffisamment stables pour être conservés à température ambiante. Le froid ralentit puis, lorsqu'il est suffisamment intense (généralement inférieur à 4 °C), interrompt le métabolisme microbien. La réfrigération et la congélation endorment donc les microbes, mais ne les détruisent pas. Des précautions sont alors indispensables dans l'application du froid. La réfrigération et la congélation doivent être : appliquées à un aliment peu contaminé, les plus précoces possibles, et continues. Attention, donc, à nos courses qui traînent dans nos voitures surchauffées, et à

nos plats laissés à refroidir à température ambiante. Dans sa fiche *Hygiène dans la cuisine, 10 recommandations pour éviter les intoxications alimentaires*, l'Anses préconise de mettre au frigo les aliments dans les deux heures suivant leur préparation, quitte à les répartir dans de petits contenants pour qu'ils refroidissent plus vite. Ceci est valable même pour les aliments qui seront recuits, car certains micro-organismes, comme *Staphylococcus aureus* et *Clostridium perfringens,* produisent des toxines qu'ils libèrent dans l'aliment au moment de leur multiplication et qui ne sont pas détruites par la cuisson.

J'ajoute que la conservation au frais se fait pour une durée limitée, et qu'il ne faut pas se contenter d'un froid relatif. La plupart des bactéries cessent de se multiplier en dessous de 4 °C. Néanmoins,

Microbes sous surveillance

Pour assurer la sécurité des aliments, les microbes sont surveillés par les services de contrôle et les professionnels de l'agroalimentaire, depuis le champ jusqu'à l'étal du marchand et l'assiette des cantines. La surveillance permet de répondre aux questions suivantes en cas de problème : quelles denrées sont contaminées ? Par quel microbe ? D'où vient cette contamination ? Lorsqu'un lot d'aliments est contrôlé positif à un germe pathogène, les aliments sont retirés de la vente ou rappelés. Tous les moyens sont bons, des simples affichettes chez les distributeurs aux annonces *via* des médias tels qu'Internet, la radio et la télévision, en passant par l'appel aux clients, identifiés par leur carte bancaire.

Les maladies d'origine alimentaire sont aussi surveillées par des réseaux de biologistes et de cliniciens volontaires. Même notre médecin traitant est tenu de déclarer certaines maladies comme la salmonellose. Si une même maladie d'origine alimentaire semble toucher plusieurs personnes dans un laps de temps restreint, une enquête est déclenchée pour en déterminer l'origine, puis le processus retrait/rappel est mis en place.

Ce système fonctionne bien, puisqu'il n'y a en France qu'environ 250 000 cas estimés d'intoxications alimentaires, dont un quart serait d'origine bactérienne, un quart d'origine virale et le reste dû à des parasites. Très peu sont mortelles : 4 à 7 cas mortels en France par an et par million d'habitants, à comparer à 460 morts par cancer du poumon.

certaines, comme les bactéries pathogènes *Listeria monocytogenes* ou *Clostridium botulinum* E, continuent leur division, et cela d'autant plus rapidement que la température de réfrigération est élevée. D'où l'importance d'une température du frigo maintenue la plus basse possible, entre 0 °C et 4 °C. Connaissez-vous la température du vôtre ? Au mois de juillet 2017, les résultats de la 3e enquête de l'Anses sur les consommations et les habitudes alimentaires de la population française (Inca 3) sont parus, et ils sont révélateurs : la température du frigo varie entre 2 °C et 6 °C pour 50 % des ménages, elle est supérieure à 6 °C pour 44 %, et à 8 °C pour 20 %. C'est là notre responsabilité qui est engagée. Les portes des frigos trop souvent ouvertes et les restes rangés tièdes sont à prohiber. Et surtout, ne relevons pas le thermostat parce que le yaourt nous paraît trop froid !

Pourquoi lire les étiquettes ?

Son gendre étant sorti sur la terrasse, Eugénie est à nouveau seule dans la cuisine. Tout en buvant tranquillement son café, elle prépare des étiquettes à poser sur ses pots de confitures. Elle va se contenter de noter *Groseilles 2018*. Et de mettre ses initiales en forme de smiley comme Flore lui a appris à faire.

Petite, je lisais toujours les étiquettes des yaourts. Aujourd'hui, je continue… avec toutes les étiquettes. Sur celles des aliments industriels se trouvent de nombreux renseignements : la composition, des conseils de conservation, de cuisson, de décongélation… On y trouve aussi une date. Dans le cas des confitures, comme des autres produits stables par leur composition, cette date est la date de durabilité minimale, ou DDM. Elle orne aussi les emballages des conserves et des surgelés. Son « à consommer de préférence avant le » veut tout dire. Au-delà de la DDM, l'aliment peut perdre certaines de ses propriétés nutritionnelles ou gustatives, mais reste consommable sans risque pour la santé.

La DDM se distingue de la DLC. De nombreux aliments conservés au frigo possèdent une date limite de consommation, reconnaissable par son « à consommer jusqu'au ». Au-delà de cette date, le produit n'est plus garanti comme non susceptible de provoquer une intoxication alimentaire. La DLC est importante, et pourtant, nous autres, consommateurs, ne la respectons pas toujours. Les résultats de l'enquête Inca 3 témoignent de comportements étonnants : 50 % des ménages consomment saumon fumé et viande préemballés après la DLC. Est-ce une préoccupation anti-gaspillage louable qui pousse à ces comportements à risque ? On consomme le produit après la DLC parce qu'il ne paraît pas altéré. Il est donc important de rappeler que les microbes pathogènes peuvent provoquer des intoxications alimentaires à des concentrations où ils ne sont pas perceptibles, même si ce n'est pas systématique.

Modéliser pour prévoir

La DLC est généralement déterminée sous la responsabilité du producteur. Il peut, pour cela, réaliser des « challenges-tests », pendant lesquels il surveille l'évolution des microbes volontairement ajoutés dans ses produits. Mais ces expérimentations sont longues et coûteuses. Alors, il peut aussi utiliser la microbiologie prévisionnelle. À partir des propriétés physico-chimiques de l'aliment (a_w, pH, teneur en conservateurs), des conditions de conservation (composition en CO_2 de l'atmosphère de l'emballage et températures), de données regroupées dans d'immenses bases, il établit un modèle prédictif de la croissance des bactéries cibles. Il en déduit le temps pour atteindre la concentration bactérienne à ne pas dépasser. Une marge de sécurité, une vérification sur quelques vrais produits, et la DLC est fixée. J'ai un jour sorti de mon frigo des saucisses conditionnées sous atmosphère protectrice qui présentaient une altération manifeste avant la DLC : de petites excroissances inhabituelles, luisantes, rosâtres à jaunâtres — des colonies microbiennes — étaient visibles. Mauvais calcul de DLC ? Non. J'ai détecté une perforation de l'emballage. De tels produits sont conservés grâce au froid et à une atmosphère optimisée. S'ils entrent en contact avec l'air, la maîtrise des microbes n'est plus assurée. De même si la température n'est pas adéquate.

En complément de la DLC, des étiquettes « intelligentes » qui changent de couleur en fonction du temps et de la température de l'aliment ont été utilisées dans les années 1990-2000. Elles ont été abandonnées, mais de nouvelles versions plus pertinentes sont actuellement prêtes à être mises sur le marché. Combineront-elles sécurité sanitaire des aliments et lutte anti-gaspi ?

Et les bouchées salées du traiteur qui remplissent le frigo de Valérie ? Elles n'ont pas de date de péremption affichée. S'il en reste après la fête, jusqu'à quand les conserver ? Si le traiteur n'a pas donné d'indications, il vaut mieux que la petite famille finisse le tout sous trois jours, et surtout qu'elles ne traînent pas à température ambiante toute une journée. Sinon, poubelle ! Ceci est aussi valable pour ce que nous préparons nous-mêmes, et pour le lait ouvert par Eugénie.

De l'importance de la recette

Son café bu, Eugénie s'attaque enfin aux confitures. Elle mouline les groseilles pour en extraire le jus, qu'elle pèse, et ajoute le sucre : 800 g pour 1 kg de jus de groseilles. Elle porte le tout à ébullition et remue patiemment pendant 30 min. La goutte de confiture qu'elle laisse tomber sur une coupelle froide se fige. C'est bon. Elle écume le liquide rouge, remplit les pots à chaud, les ferme et les retourne.

La recette que suit Eugénie est « vieille comme le monde ». Elle la tient de sa mère et espère la transmettre à ses petites-filles. Les confitures ainsi fabriquées sont bonnes et se conservent bien. Mais si Louise, pour préserver sa minceur ou par goût, abaissait la teneur en sucre, que se passerait-il ? Pas grand-chose. Car la confiture est stabilisée non seulement par une a_w réduite, mais également par le pH de 2,9 des groseilles. L'acidité conserve, et un pH en dessous de 3,7 empêche le développement de toute bactérie pathogène. Si des contaminants se développaient dans ce produit sucré et acide, les premiers seraient des moisissures, bien visibles et généralement non

pathogènes. Elles donneraient l'alerte pour que la confiture ne soit pas mangée.

Et si Louise utilisait le micro-ondes au lieu de la traditionnelle gazinière, serait-il aussi efficace pour détruire les microbes et concentrer le sucre ? Tout dépend du temps appliqué. Mais, étant donné l'effet stabilisateur du sucre et du pH, ce qui se joue ici avec la cuisson, c'est surtout la tenue de la confiture.

Dans le cas de la confiture, le risque est donc faible avec d'éventuelles modifications de recette. Ce n'est pas toujours le cas, et les slogans « ne pas manger trop sucré, trop salé » des programmes nationaux nutrition-santé pourraient ne pas toujours faire bon ménage avec la sécurité sanitaire. Par exemple, cette question a été soulevée : l'augmentation des cas de listériose (maladie due à *Listeria monocytogenes*) observés ces dernières années au Royaume-Uni n'est-elle pas en partie attribuable aux plans de réduction de sel dans les aliments ?

Suivre la recette, c'est aussi suivre les barèmes temps/température des stérilisations et des cuissons, qui sont garants du niveau de destruction. Un exemple très éloquent concerne *Clostridium botulinum*. Ce microbe est anaérobie (il se développe sans oxygène), sporulé (il a des formes de résistance aux traitements thermiques), et très dangereux (il produit des toxines botuliques). C'est le contaminant microbien le plus dangereux des conserves. En 2011, 9 cas de botulisme — heureusement sans mortalité — ont été déclarés en France à la suite de l'ingestion d'une tapenade. Les artisans responsables étaient peut-être fraudeurs — ils n'avaient pas déclaré leur installation, qui n'était donc pas contrôlée — et sûrement incompétents. Ils utilisaient un matériel inadapté pour « stériliser » leurs bocaux : une « machine de type lessiveuse ».

Un modèle mathématique très simple de microbiologie prévisionnelle permet de calculer qu'à une température de traitement de 100 °C obtenue avec l'équipement utilisé, il faut 6 h 20 min pour atteindre les 99,9999999999 % de destruction du microbe

Tout nouvel aliment est soumis à une AMM

L'homme invente sans cesse. De nouveaux aliments. De nouveaux moyens pour les stabiliser et détruire les microbes. Y a-t-il un risque à cela ? Même si le risque zéro n'existe pas, les pouvoirs publics font tout pour le limiter, et un industriel ne peut pas mettre sur le marché n'importe quelle denrée alimentaire. Il suit des règlements et est surveillé.

Tout aliment commercialisé dans l'Union européenne ne doit pas être dangereux, à savoir préjudiciable à la santé ou impropre à la consommation humaine (règlement CE n° 178/2002, ou Food Law). C'est une obligation d'objectif qui est donnée aux industriels. À eux d'adapter leurs moyens à ces objectifs à travers leurs méthodes de production et leurs contrôles.

De plus, lorsque l'aliment est nouveau, que ce soit par ses ingrédients ou par ses procédés de transformation et de décontamination, il entre dans le cadre du règlement UE 2015/2283 et doit faire l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM). Il est soumis à une évaluation portant notamment sur sa qualité microbiologique (maîtrise des flores pathogènes et des toxines, absence d'apparition de résistances microbiennes) et sa qualité chimique (maîtrise des composés migrants de l'emballage, ou formés dans les aliments par la nouvelle technologie).

recommandés. On imagine difficilement mettre des bocaux à bouillir durant si longtemps, d'autant qu'il ne faut que 3 min à 121 °C (température obtenue dans un autoclave ou une cocotte-minute) pour la même efficacité destructrice.

Toute modification d'un procédé de fabrication, ou de la composition de l'aliment, doit amener à se poser la question de l'impact sanitaire. Et nous qui ne réalisons pas d'études de microbiologie prévisionnelle lorsque nous préparons des aliments que nous souhaitons conserver, ne jouons pas aux apprentis sorciers, suivons les recettes ! Elles ont fait leurs preuves.

Maîtriser les 5 M

Revenons en arrière. Qu'a fait Eugénie avant de cuisiner ? Elle a enfilé un tablier propre et s'est lavé soigneusement les mains. Elle a ensuite nettoyé méticuleusement les pots : elle les a remplis d'eau

bouillante, fermés, retournés, puis les a laissés ainsi jusqu'au moment de les remplir.

Pour assurer l'innocuité des aliments consommés par les astronautes, les Américains ont inventé la méthode HACCP (*Hazard Analysis Critical Control Point*) d'analyse des dangers et des points critiques. Elle est maintenant utilisée par la plupart des industriels et prend souvent en considération cinq sources de contamination. Ce sont les 5 M : matière première, méthode, main-d'œuvre, milieu et matériel. Nous utilisons souvent intuitivement l'HACCP.

Lorsqu'elle se lave soigneusement les mains (3e M), Eugénie applique une des règles essentielles de la maîtrise des contaminations. Cette règle est-elle suffisante pour limiter la contamination manuportée ? Indubitablement oui. À la maison, nul besoin de se désinfecter les mains avec des gels hydroalcooliques avant de cuisiner ou de manger, sauf si l'on est malade ou si l'on cuisine pour des personnes sensibles (immunodéprimées). Ces gels risqueraient même de perturber notre flore cutanée. En revanche, le port de gants et la désinfection des mains s'observent sur les chaînes de fabrication des industries agroalimentaires et dans les rayons de vente au détail de charcuterie, viande et autres fromages des grands distributeurs, voire de plus en plus des petits commerces. Dans des conditions de multiplicité des contacts et de nombre élevé de personnes concernées, ces précautions sont importantes.

En nettoyant les bocaux, en les passant à l'eau bouillante, et en retournant les pots remplis à chaud, Eugénie maîtrise aussi la contamination apportée par le matériel (5e M) et l'air (4e M). Et les deux premiers M ont parfaitement été pris en compte : groseilles lavées et utilisées aussitôt cueillies (1er M), recette suivie à la lettre (2e M).

Eugénie sourit. Les confitures sont prêtes. Huit pots qui ne moisiront probablement pas jusqu'à l'an prochain… par dégustation précoce !



5

JEAN-MICHEL, LE GRAND-PÈRE JARDINIER

Où l'on se rend compte de l'importance des microorganismes dans la production de nos potagers. Où l'on découvre quelques relations privilégiées entre microbes et microfaune du sol, entre microbes et plantes, entre microbes et insectes.



Jean-Michel est le grand-père paternel de Louise. Il a travaillé à l'usine dès ses 16 ans — l'âge qu'aura Louise demain — et a été ouvrier durant presque toute sa vie. Il s'adonne maintenant au jardinage avec passion.

À 10 heures, Jean-Michel œuvre dans le jardin d'Antoine : il bêche, retourne, arrache, coupe. Deux vers de terre s'échappent d'une motte de terre retournée. Jean-Michel connaît l'importance des lombrics pour la bonne santé du sol et des plantes. Il sait que, par leurs galeries, ils aèrent, drainent et facilitent l'installation racinaire. Mais a-t-il conscience qu'ils sont de véritables réservoirs à microbes qui enrichissent le sol ?

Mieux que de l'engrais

Jean-Michel a prévu de planter des pommes de terre, même si c'est un peu tard dans la saison. Tout en enfouissant des tubercules, il repense au film qu'il a vu il y a quelque temps avec ses petites-filles, *Seul sur Mars*. Quelle tête éberluée a fait Flore lorsqu'elle a vu le héros ensemencer le sol avec des excréments pour faire pousser de précieuses pommes de terre ! Eh oui, rien ne pousse dans un sol stérile ! Les réalisateurs le savaient.

Tout bon sol grouille de microbes. Un gramme de sol végétalisé contient environ 1 milliard de microbes et de 10 000 à 25 000 espèces. Les estimations sont d'autant plus larges que la plupart de ces microbes ne sont pas cultivables et ne peuvent être étudiés que par des techniques de biologie moléculaire. Souvent en dormance, les microbes du sol se réveillent lorsqu'ils rencontrent des conditions favorables : des litières riches en humus, l'appareil digestif de vers de terre ou l'environnement racinaire de plantes.

Les microbes du sol sont étroitement associés aux plantes au niveau des racines, et la rhizosphère (portion de sol soumise à l'influence des racines) est le lieu d'intenses échanges. Les racines

exsudent des molécules (sucres, acides aminés) qui servent de substrats pour les microbes. Ces derniers peuvent simplement bénéficier de l'apport des plantes dans une relation de commensalisme. Certains s'avèrent phytopathogènes, et d'autres développent une relation mutualiste (voire symbiotique) qui stimule la croissance des plantes ou les protège. Ces microbes — des bactéries ô combien importantes — sont parfois désignés sous l'acronyme anglais PGPR pour *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria*.

Les PGPR stimulent la croissance des plantes, en fournissant par exemple des éléments minéraux. Prenons le cas des minéraux azotés. Des ions ammonium sont produits par les bactéries fixatrices d'azote à partir de l'azote contenu dans l'air (N_2) et par les décomposeurs (bactéries, champignons) à partir d'azote organique. Ces ions sont ensuite transformés par les bactéries nitrifiantes en nitrites, puis en nitrates que les plantes assimilent. À cela s'ajoute la fixation symbiotique de l'azote par les bactéries comme *Rhizobium leguminosarum* présentes dans les nodosités des racines des légumineuses. Bénéfices mutuels : les bactéries fournissent les substances azotées, et les plantes, le carbone. Autres exemples de stimulation par les PGPR : *Bacillus amyloliquefaciens* produit de l'auxine, une hormone de croissance qui stimule la croissance racinaire et potentialise ainsi les mécanismes d'adsorption racinaire. Et la souche IT45 de *Bacillus amyloliquefaciens* améliore la biodisponibilité du phosphore. Elle est utilisée en biofertilisation, y compris pour des cultures industrielles, parfois en association avec des champignons à mycorhizes.

Dans un contexte plus large, les microbes sont d'ailleurs indispensables aux cycles biogéochimiques de l'azote, du carbone, du phosphore, du soufre, etc., et ils sont impliqués dans la décomposition de la matière organique et la formation de l'humus. Les champignons de la pourriture blanche sont même capables de décomposer la lignine du bois… et par la même occasion des polluants particulièrement récalcitrants comme des hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Les mycorhizes : une symbiose à (re)découvrir

Comme le dit Marc-André Selosse dans son livre *Jamais seul* : « La plupart des plantes ne sont donc jamais seules. Elles ont vitalement besoin de champignons du sol pour les nourrir, qui eux aussi dépendent de leurs hôtes végétaux : même grandes, même avec des croissances vigoureuses, 90 % des plantes dépendent de champignons, en véritables colosses (à l'échelle des hyphes de champignons) aux racines microbiennes. »
Marc-André Selosse fait ici référence à la mycorhize, une association symbiotique entre les racines des plantes et des champignons. Les racines mycorhizées sont plus abondantes que celles qui ne le sont pas, ce qui favorise la capacité d'absorption de l'eau et des minéraux par la plante. Quant au champignon, il récupère du carbone organique de la plante. Mais les rôles de la symbiose ne sont pas que nutritionnels : la mycorhize augmente la résistance aux maladies, notamment celles dues aux champignons pathogènes.
Les symbioses mycorhiziennes s'installent spontanément à partir des champignons du sol, sauf cas particuliers de sols très pauvres ou artificiels. Des solutions commerciales sont alors disponibles pour nous permettre d'inoculer des champignons symbiotiques. Si les géraniums de ma mère sont resplendissants, peut-être est-ce une question de mycorhizes !

Les PGPR ont aussi des rôles phytoprotecteurs basés sur plusieurs mécanismes. Elles colonisent la surface des racines, mycorhizées ou non, et servent de barrières aux pathogènes. Elles consomment les nutriments avant les phytopathogènes. À titre d'exemple, les *Pseudomonas* piègent le fer, un élément très recherché par les microbes pour se développer (voir chapitre 6). Les PGPR synthétisent aussi des enzymes qui vont détruire des champignons phytopathogènes. Et elles produisent des antibiotiques et des bactériocines. De nombreux *Bacillus* synthétisent ainsi les antibiotiques polymixine et colistine, actifs contre de nombreuses bactéries et champignons. Les PGPR sont même capables d'induire des mécanismes de résistance chez les plantes par l'intermédiaire de signaux moléculaires. Il a ainsi été montré que des rhizobactéries entraînent une défense accrue des

plants de concombre contre le charbon végétal (ou anthracnose) dû au champignon *Colletotrichum orbiculare*.

Pas étonnant que, dans ces conditions, le biocontrôle devienne une nouvelle stratégie agriculturale… Ni qu'il faille choyer les vers de terre. Ils ingèrent sans cesse de la terre et des résidus végétaux riches en microbes. Ces derniers trouvent dans le tube digestif des lombrics un environnement favorable où ils se multiplient allègrement avant d'être disséminés dans le sol par l'intermédiaire des turricules (déjections des vers). Les vers permettent ainsi un ensemencement microbien du sol, et sont gages de sa bonne qualité.

En présence de renards…

Hier, Jean-Michel a ramassé les groseilles. Aujourd'hui, il s'attaque aux fraises. Elles ne sont pas nombreuses mais promettent d'être délicieuses. Quelques poignées à déguster nature avec du sucre. Pour le faire en toute bonne conscience, Jean-Michel s'assure de l'intégrité de la barrière qui encercle le jardin potager. On a beau être en région parisienne, la maison est en bordure d'un bois et, pas plus tard que la nuit précédente, il a entraperçu un renard qui se faufilait dans le pré voisin.

Les renards peuvent être porteurs d'*Echinococcus multilocularis*, un ver dont les œufs sont disséminés dans l'environnement par les fèces. L'homme peut se contaminer en consommant des végétaux souillés par ces œufs, et développer une maladie hépatique grave, l'échinococcose alvéolaire, qui se traduit à terme par une insuffisance hépatique, une cirrhose, et parfois des métastases pulmonaires, cérébrales ou osseuses. La survenue des symptômes peut prendre 5 à 15 ans. Même si le risque qu'elles aient été souillées par des fèces de renard porteuses de parasites gravides est faible, j'ai toujours su que je ne devais manger crues ni les myrtilles des montagnes, ni les mûres basses (situées à moins de 1 m de hauteur) des haies campa-

gnardes. C'est une leçon que je transmets à mes enfants. Par contre, nul danger avec une bonne confiture ou une tarte. Une cuisson de 5 min à 70 °C suffit pour détruire les œufs du parasite.

Ne comptez pas ici sur la congélation comme technique d'assainissement. Si elle est efficace pour détruire les larves d'*Anisakis* dans les poissons (voir chapitre 7), elle ne l'est pas pour les œufs d'*Echinococcus multiloculari*. Pas plus qu'elle n'est efficace pour détruire les virus. Ceux-ci peuvent ainsi contaminer les fruits surgelés potentiellement destinés à être consommés crus et leur présence, lorsqu'elle est détectée, conduit à un rappel des produits. Vous avez sûrement déjà vu des affichettes de rappel concernant des fruits surgelés. La dernière dont je me souviens visait des framboises contaminées par des norovirus. Faites l'expérience. Si vous tombez sur une telle affichette, demandez en caisse ou cherchez sur Internet ce qui se cache derrière le rappel. Et voyez si vous découvrez un virus !

Les contaminants de nos fruits et légumes ont des origines multiples. Ils viennent de l'eau d'arrosage, de la pluie, du fumier, de l'air, du contact avec des hommes ou des animaux, des insectes, etc. Ces contaminations sont généralement en surface, mais les microbes peuvent aussi s'internaliser lors du développement des végétaux. Même si ces bactéries ne se développent pas dans ces conditions, elles peuvent survivre et être protégées des traitements de décontamination. Attention, donc, à notre eau d'arrosage et à nos engrais, même s'ils sont bio. Un bon compost est d'ailleurs un compost dont les microbes pathogènes ont été tués par une montée en température liée aux fermentations (voir chapitre 9).

Les insectes raffolent des microbes… ou pas

La terre retournée, les pommes de terre plantées, les fraises cueillies, Jean-Michel administre un traitement préventif à base de

purin d'ortie sur les plants de tomates et les rosiers. Il a bon espoir de limiter ainsi le développement de l'oïdium et les invasions par les pucerons.

Chaque être vivant a son propre microbiote. Il en va ainsi des insectes comme des plantes… ou de l'homme. Si les pucerons peuvent vivre de sève, c'est grâce aux bactéries *Buchnera* qu'ils hébergent et qui leur fournissent les acides aminés essentiels absents de la sève. L'alliance entre l'insecte et la bactérie est forte : cela fait bientôt cent mille ans qu'ils coévoluent. Ce n'est qu'une symbiose parmi d'autres. Les pucerons du pois, nés de couleur rose, deviennent verts lorsqu'ils sont porteurs des bactéries *Rickettsiella*. Ils gagnent ainsi en capacité de camouflage dans leur monde essentiellement vert.

Avez-vous déjà remarqué des feuilles de pommiers enroulées qui restent vertes alors que le reste des feuilles jaunit ? Déroulez-les et vous y découvrirez probablement une larve de mineuse du pommier. La larve héberge des *Wolbachia*, qui possèdent des gènes codant pour une protéine (cytokinine) favorisant la production de chlorophylle. La feuille reste verte et l'insecte peut continuer à se nourrir ! *Wolbachia* vit dans le cytoplasme des cellules de ses hôtes et se transmet d'hôte à hôte par l'intermédiaire des ovocytes. Les femelles lui sont donc beaucoup plus utiles que les mâles. Qu'à cela ne tienne, la bactérie est capable d'exercer une pression de sélection positive pour les femelles, et peut même féminiser certains de ces hôtes, comme les cloportes.

En tant que jardinière amatrice, mon ressenti est mitigé sur les interactions microbes-insectes, car elles favorisent des phytopathogènes. Dans ma vie quotidienne, je me méfie des insectes vecteurs de zoonoses (maladies transmises d'animaux à hommes, et inversement). Notamment, j'inspecte mes enfants après toute balade en forêt et je vérifie qu'ils n'ont pas de tiques. Celles-ci sont de plus en plus porteuses de *Borrelia*, des bactéries spiralées qui transmettent la maladie de Lyme.

En tant que scientifique, j'admire les interactions microbes-insectes de toute nature. Et je n'ai plus aucune restriction lorsqu'elles concernent les abeilles et les bactéries lactiques. Récemment, des chercheurs ont montré que le jabot des abeilles est colonisé par des biofilms réunissant plus de dix espèces de *Lactobacillus* et de *Bifidobacterium*. Ces bactéries sont connues pour leur production de composés antimicrobiens, qui participeraient au pouvoir antiseptique du miel. Nous utilisons d'ailleurs le miel en cas de maux de gorge (sauf pour des enfants de moins de 1 an, voir chapitre 7), et des études prouvent son efficacité dans la cicatrisation des brûlures et des plaies.

Les microbes au service de la lutte biologique

La carpovirusine a été mise au point dans les années 1980 par l'Institut national de recherche agronomique (Inra). Elle permet de lutter contre un des ravageurs principaux des pommes : le papillon de nuit nommé carpocapse des pommes (*Cydia pomonella*), dont la larve se développe au niveau des pépins. La carpovirusine est à base de granulovirus de *Cydia pomonella* (CpGV), un virus qui se multiplie dans les larves du papillon en les tuant, et est autorisée en agriculture bio.

Autres cultures, autres microbes. Pour limiter les pertes dues aux altérations microbiennes dans la culture des champignons de Paris, la plupart des exploitants français utilisent la bactérie *Bacillus subtilis* qui forme des biofilms protecteurs. Le champignon *Lecanicillium lecanii* est, lui, pulvérisé sur les plants de tomates pour lutter contre les mouches blanches (aleurodes). Ses hyphes pénètrent dans les larves des insectes qu'il détruit. Et *Bacillus thuringiensis* s'attaque aux larves de nombreux insectes, dont celles de la pyrale, qui ravagent les buis.

Avant que l'on puisse utiliser les agents de biocontrôle sur des fruits ou des légumes, leur innocuité est évaluée par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (AESA) selon une approche dite « QPS » (*Qualified Presumed as Safe*). Les agents de biocontrôle qui ne font pas partie des microbes QPS doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation de mise sur le marché (AMM).

Quand on parle abeilles et miel, on parle fleurs et pollinisation. Si les fleurs attirent les insectes par leurs odeurs, elles les attirent aussi par… leurs microbes. C'est en tout cas ce que semblent montrer les fleurs de sureau qui, privées de leur microbiote floral, émettent moins de composés odorants.

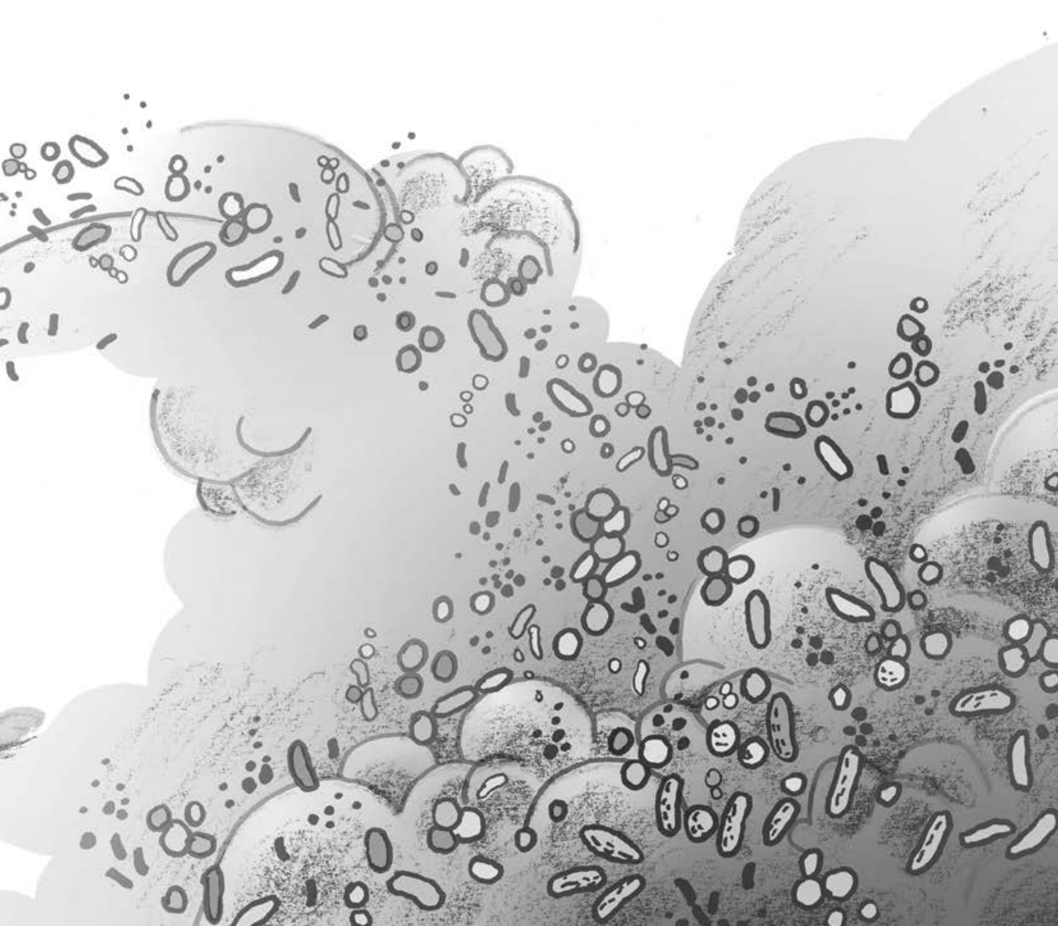
Jean-Michel quitte le jardin. Une légère pluie serait la bienvenue pour les plantations qu'il vient d'effectuer. Jean-Michel aime l'odeur de la terre mouillée après la pluie. Elle est notamment due à la géosmine, une molécule produite par des bactéries filamenteuses qui participent à la décomposition des végétaux.

Le ciel bleu lui laisse peu d'espoir pour une pluie prochaine. D'un autre côté, il est préférable que le soleil brille en ce week-end de fête.



6
FLORE, LA PETITE SŒUR, ARTISTE EN HERBE

Où les microbes magnifiant les paysages qui nous entourent sont considérés sous un angle poétique. Où l'on découvre leurs architectures microscopiques, leurs voyages dans le vent ou dans le cycle de l'eau, et leur rôle dans la météorologie.



Flore a 8 ans. Elle partage avec Louise le même bleu des yeux. Ses cheveux blonds sont généralement noués en une natte épaisse qui lui arrive au milieu du dos. Flore est un condensé d'énergie. Vive, gaie… et artiste.

À 10 heures, elle est assise dans un coin de la terrasse, face au jardin. Son esprit vagabonde. Imagine-t-elle les êtres microscopiques qui se cachent derrière ce qu'elle perçoit ?

Faiseurs de pluie

Quand Flore lève les yeux au ciel, elle voit des dragons qui se transforment en phénix avant de redevenir nuages et de s'effilocher. Elle s'invente des histoires de chevaliers défendant leur château au péril de leur vie. Mais elle n'est pas du genre princesse qui attend son prince charmant. Plutôt Rebelle.

Dans les nuages, nul être fantastique. Quoique… Les cumulus et autres cirrus contiennent notamment des bioaérosols. Ces mélanges de fragments de végétaux et d'insectes, de pollens et… de microbes peuvent représenter jusqu'à 25 % du nombre des particules solides des nuages. La plupart des microbes contenus dans les nuages sont viables (présentant une capacité métabolique), certains sont même cultivables (capables de se multiplier dans des milieux de culture en laboratoire).

Ces microbes sont-ils des chimistes de l'atmosphère ? C'est une question à l'étude. Ils contribuent probablement à la dégradation des composés organiques des nuages « chauds » (de température positive), en complément de la photochimie, et ils réduisent peut-être les molécules oxydantes présentes. Parmi ces dernières, on trouve l'ozone, les radicaux hydroxyle, nitrate et sulfate, et l'eau oxygénée. Lorsqu'elles sont présentes en excès, elles deviennent problématiques et sont, par exemple, responsables de brouillards oxydants (le *smog* londonien) et de pluies acides. Les microbes

transformeraient notamment l'eau oxygénée en oxygène et eau par l'intermédiaire d'enzymes. Tout cela dans un environnement rendu particulièrement inhospitalier par les oxydants eux-mêmes, mais aussi par les radiations solaires et les basses températures de l'atmosphère. Chaud pour un nuage reste froid pour un microbe ! Les nuages ne sont d'ailleurs pas un lieu de vie habituel pour les microbes. Ils n'y sont qu'en transit.

Les microbes sont enlevés à la terre, à la mer et aux autres surfaces de notre environnement par le vent et la pluie. Imaginez une goutte de pluie rebondissant à la surface d'une feuille. Ce faisant, elle arrache une partie du biofilm qui s'y trouve et participe à l'aérosolisation des microbes. Une bonne partie des microbes contenus dans les grêlons — et donc dans les nuages — sont d'ailleurs des bactéries de la phyllosphère (partie aérienne des plantes). Une des plus étudiées est *Pseudomonas syringae*. Ce pathogène des plantes possède une activité glaçogène : il facilite le gel de l'eau pure à des températures proches de zéro, ce qui est très improbable sans amorce. Le gel est pour la bactérie un facteur de virulence car les tissus ainsi abîmés de la plante lui offrent une porte d'entrée.

Les microbes aérosolisés sont véhiculés par les courants aériens dans l'atmosphère, où ils séjournent jusqu'à six mois. Ils favorisent alors la formation des nuages et les précipitations, lesquelles leur permettent de regagner le sol. Eh oui, les microbes font pleuvoir ! Comment ? Un nuage est formé de gouttelettes d'eau qui restent en suspension, mais lorsque des noyaux glaçogènes entraînent l'agrégation des gouttelettes, la pluie se déclenche. Si de nombreuses particules jouent ce rôle de catalyseur aux basses températures, seules des bactéries le peuvent à des températures proches de zéro, dont *Pseudomonas syringae*.

L'Inra étudie des scénarios climatiques intégrant ce phénomène de bioprécipitation. Il est même envisagé d'utiliser l'agriculture pour essayer de maîtriser, au moins partiellement, les précipitations.

Quand on sait que le flux ascendant est de 543 bactéries par m^2 et par seconde au-dessus d'un champ planté de luzerne, contre 124 pour un sol nu, on peut imaginer optimiser le couvert végétal pour favoriser l'aérosolisation de bactéries glaçogènes de la phyllosphère et faire en sorte que « la pluie ne reste pas au ciel » (proverbe finlandais), car « pluie d'avril, remplit grange et fenil » (proverbe agricole français).

Qui dit activité glaçogène dit pluie, mais aussi neige. *Pseudomonas syringae* a un temps été utilisé sous une forme inactivée pour produire de la neige artificielle. En permettant la formation de glace à des températures plus élevées, il réduisait la dépense énergétique nécessaire à la formation de neige. L'Anses s'était alors posé la question de l'innocuité de cet « adjuvant ». Le risque avait été jugé « nul à négligeable » pour les populations concernées, à l'exception des professionnels « faiseurs de neige », pour lesquels il était « négligeable à faible ». Depuis 2005, ce microbe n'est plus utilisé en France, car les stations de ski françaises ont pris l'engagement de fabriquer la neige artificielle sans adjuvants.

Démolisseurs et bâtisseurs

Quand ce ne sont pas les nuages qui inspirent Flore, ce sont les taches de lichen qui ponctuent les dalles de pierre de la terrasse. Machinalement, elle en gratte une qui ne se détache pas. Flore n'est pas étonnée. Elle a l'habitude d'entendre son père pester contre ces « saletés » qui résistent au passage du jet haute pression. Heureusement, ce grand nettoyage de la terrasse n'a lieu qu'une fois par an.

Les lichens s'incrustent sur les rochers du bord de mer, les dalles disjointes d'une terrasse ou les vieux murs. Ils sont l'archétype de la symbiose, une coopération réciproque qui s'établit ici entre un champignon — servant notamment de support et de protection — et un organisme photosynthétique (algue verte ou cyanobactérie) qui lui fournit entre autres les nutriments. D'autres microbes

peuvent coloniser la pierre, les bétons, et même les vitraux : des champignons microscopiques, des algues, et des bactéries, dont certaines donneront du salpêtre en présence d'ammoniac, et d'autres de l'acide sulfurique et des sulfates de calcium ou de potassium en présence de soufre.

On a tous en tête des exemples de bâtiments écorchés et érodés. Voyez les maisons en calcaire du Val de Loire (tuffeau). Bien entretenues, elles sont magnifiques. Mais, sans réhabilitation, elles

Les biofilms, des forteresses biologiques

Que ce soit sur des surfaces inertes ou biologiques, en absence ou en présence d'oxygène, dans l'air, dans l'eau, sur terre, à l'intérieur du corps humain ou animal, sur une plante ou une pierre, à la lumière ou dans le noir le plus total, les microbes ont tendance à se fixer et à s'agglomérer. Ils s'organisent en biofilms.

Les biofilms sont de véritables forteresses microbiennes. Solides comme le sont les châteaux médiévaux. Leurs fondations sont assurées par les premières bactéries qui s'ancrent sur le support grâce aux interactions physico-chimiques et à des appendices cellulaires (flagelles, *pili*). Les bactéries ensuite recrutées sont comme les pierres de murs qui synthétiseraient leur propre ciment constitué d'ADN, de polysaccharides, et de protéines. Une armature de bactéries filamenteuses et de champignons blinde le tout.

La vie grouille dans les forteresses biologiques. Les microbes sont les murs, mais aussi les habitants. Ils communiquent par des signaux chimiques, s'entraident (symbiose, mutualisme), s'affrontent (compétition) ou s'ignorent (neutralisme). Parfois, quelques-uns profitent des autres (parasitisme, prédation). Les bactéries mobiles se faufilent et écartent la foule microbienne sur leur passage. Elles entretiennent ainsi des espaces d'échanges (les canaux à eau) avec le milieu environnant.

On pourrait penser qu'à l'abri dans leurs forteresses, les microbes s'alanguissent. Que nenni ! Des adaptations microbiennes se font, des « mutants » apparaissent, une diversification a lieu, entraînant une résistance microbienne accrue. On a coutume de dire qu'un microbe en biofilm a une résistance 1 000 fois supérieure à un microbe libre dans le milieu. Dans ces conditions, il n'est pas étonnant d'estimer que 90 % des microbes vivent organisés en biofilms dans leur environnement naturel.

paraissent rongées par une lèpre dont l'origine biologique ne peut pas être négligée. Des microbes dits « endolithiques » sont capables de creuser la roche pour s'y développer. Les lichens et les algues peuvent dégrader les supports, qu'ils attaquent en pénétrant dans les fissures préexistantes ou en produisant des acides organiques qui en créent d'autres. Les sels de nitrate, de calcium et de potassium résultant de l'action de bactéries nitrifiantes et sulfo-oxydantes exercent, en cristallisant, des pressions qui peuvent dépasser la résistance mécanique de la pierre et la faire éclater.

Les microbes ne sont pas que vandales. Ils sont aussi bâtisseurs. Si vous vous promenez dans le Jura, vous pourrez peut-être apercevoir au fond de certains ruisseaux des rochers qui semblent ordinaires, mais ne le sont pas tout à fait. Ces rochers, appelés stromatolites, sont vivants (pour être honnête, les plus beaux stromatolites encore en formation se trouvent en Australie). Le mucilage de cyanobactéries organisées en biofilm piège des particules en suspension dans l'eau et forme une croûte de carbonates de calcium. Il existe aussi des bactéries qui précipitent, en elles ou à leur surface, le carbonate de calcium en calcaire. Lorsqu'elles meurent, le calcaire subsiste.

Pourquoi ne pas utiliser cette biominéralisation pour reconstruire ce que le temps ou d'autres microbes ont détruit ? On fabrique déjà des mortiers biologiques. Les bactéries sont pulvérisées sur la surface à restaurer et nourries d'un liquide nutritif contenant du calcium bioassimilable (lactate de calcium par exemple) mélangé avec de la poudre de pierre qu'elles agglomèrent sur leur membrane par biominéralisation. Ce procédé est exclusivement professionnel, mais peut-être trouvera-t-on un jour en grande surface du ciment contenant des spores de *Bacillus pseudofirmus* et de *Bacillus cohnii* attendant d'être réhydratées pour des constructions encore plus solides…

Lors de la réhabilitation du monastère San Jeronimo à Grenade, la nécropole des rois espagnols, aucun microbe n'a été ajouté. Pourtant, c'est bien la biominéralisation qui a permis la réfection du

bâtiment. Les chercheurs espagnols se sont « contentés » de nourrir les microbes présents dans la pierre. Et ces derniers ont œuvré, la régénérant jusqu'à 7 cm de profondeur et lui redonnant de la cohésion et une meilleure résistance aux agressions extérieures. Les microbes, bâtisseurs de cathédrales des temps modernes ?

Artisans de couleurs

Ce qui fascine particulièrement Flore dans les lichens et autres microbes des roches, ce sont leurs couleurs. Vert, blanc, gris, noir, orange, jaune. On en a plein les yeux et on peut trouver du charme aux développements microbiens. De nombreuses maisons autour de chez moi sont « décorées » de formes rouges, sûrement des algues de la famille des *Trentepohlia*. Comme Flore, cela me fait rêver. J'ai en tête un mur où les microbes se sont développés avec l'apparence de mains tendues en coupe vers le ciel. Par contre, je n'aime pas les salissures noires — probablement des cyanobactéries — qui dégoulinent le long des murs au niveau des ruissellements.

Les microbes sont encore plus problématiques quand ils s'attaquent au patrimoine historique : les biofilms noirs du dôme du Jefferson Memorial et du Lincoln Memorial, aux États-Unis, ne sont pas du goût des conservateurs et architectes, pas plus que ceux des temples d'Angkor, au Cambodge, ou des monuments égyptiens. Quant aux moisissures qui se développent dans la grotte de Lascaux, elles mettent en danger des peintures rupestres vieilles d'environ 18 000 ans. Les fresques étaient restées intactes durant tout ce temps et voilà qu'en 1960, vingt ans après leur découverte, une « maladie verte » d'origine algale les a menacées. Puis, au printemps 2001, c'était la moisissure blanche *Fusarium solani* et, en juillet 2007, des taches noires d'*Ochroconis lascauxensis* et *Ochroconis anomala*. Une fois l'écosystème perturbé, il est difficile de retrouver un équilibre !

Certains de nos paysages naturels sont magnifiquement façonnés par des microbes multicolores. Le plus célèbre est probablement celui d'une des plus importantes sources d'eau chaude au monde : le Grand Prismatique, à Yellowstone, aux États-Unis. Sa couleur est orange-rouge l'été et vert foncé l'hiver, en fonction des espèces de cyanobactéries qui s'y développent. Pour parfaire le tout, s'y ajoute une touche de jaune. C'est du soufre, un produit du métabolisme des bactéries sulfo-oxydantes… pourpres. Le Fly Geyser, au Nevada, se pare aussi de magnifiques couleurs brillantes, ocre, jaunes et vertes dues à des microbes thermophiles. Ce geyser est né accidentellement

Les multiples rôles des pigments microbiens

Phycoérythrine rouge, phycocyanine et pyocyanine bleues, caroténoïdes orange, chlorophylle verte, zéaxanthine jaune… Les pigments ont des rôles aussi nombreux que leurs couleurs, et permettent aux microbes de se développer dans leur environnement.

Certains sont impliqués dans la photosynthèse. Les plus importants sont les pigments chlorophylliens que l'on retrouve chez les cyanobactéries, les bactéries sulfureuses et tous les organismes photo-autotrophes (algues et plantes, qui utilisent le CO_2 comme source de carbone et la lumière comme source d'énergie). Ils sont aidés par d'autres (caroténoïdes, phycoérythrines et phycocyanines). Les caroténoïdes exercent également un effet photoprotecteur en absorbant les ultraviolets et en neutralisant les radicaux libres toxiques. Ils ont cette même fonction chez les microbes et chez nous (on les trouve notamment dans la rétine de nos yeux).

La zéaxanthine est le pigment caroténoïde jaune de *Staphylococcus aureus* (aussi appelé « staphylocoque doré », voir chapitre 8). En plus des rôles cités ci-dessus, l'action antioxydante du pigment participe au pouvoir pathogène de la bactérie, notamment en neutralisant les molécules de défense de l'hôte. Chez *Pseudomonas aeruginosa*, les pigments pyocyanine et pyoverdine facilitent la croissance de la bactérie. Ainsi, ils transportent le fer (lequel est un élément indispensable au développement microbien, mais souvent peu disponible et limitant) et donnent un avantage compétitif à *Pseudomonas aeruginosa* par rapport aux autres microbes.

d'un forage en 1964. Il jaillit au milieu d'une roche calcaire qui se forme continuellement et s'élève actuellement à presque 4 m.

Il paraît aussi que *Trichodesmium erythraeum* (du grec *erythros*, rouge) a donné son nom à la mer Rouge. Lorsque ces cyanobactéries prolifèrent, elles couvrent l'eau de biofilms rouges. Moins loin, les massifs de marbre rouge des Ardennes contiennent des pigments ferrugineux d'origine microbienne. Si les ocres avaient une telle origine, j'aurais décrit avec plaisir Roussillon et le Colorado de Rustrel, en Provence, avec leurs « 24 teintes officiellement recensées, qui vont du gris au vert, en passant par le jaune et le rouge ». Mais tout ne peut pas être microbien !

Drôles d'artistes !

Flore s'est fixé une mission : écrire un poème pour l'anniversaire de sa sœur. Elle tire un papier de sa poche et s'empare du stylo planté dans sa tresse. Ce stylo n'a rien de spécial, mais il pourrait bien un jour contenir de l'encre microbienne.

Une start-up française s'est mis en tête de faire produire « en quantité industrielle » des pigments colorés par des microbes. Et elle y est parvenue. Quelques jours à 25 °C, et des streptomycètes voient la vie en bleu. Les couleurs devraient être disponibles en 2018 avec comme principales applications de l'encre pour stylos ou imprimeries et de la teinture pour tissus et cuirs. Et si cette couleur était ensuite utilisée pour teindre un tissu d'origine microbienne ? En 2006, lors de la deuxième conférence internationale sur les biotechnologies industrielles, défilait un mannequin vêtu d'une élégante robe de mariée, longue, fluide et résistante. Les fibres du tissu provenaient de maïs dont l'amidon avait été transformé par des levures en un biopolymère comparable au polyester. Voilà de quoi inspirer des artistes, qu'ils soient poètes, peintres ou couturiers.

On peut être un scientifique biologiste un peu fou et créer des robes bactériennes avec la mère de vinaigre. Le biofilm épais qui se forme lors de la transformation du vin en vinaigre est utilisé comme un tissu qui s'autoassemble sur le mannequin. La robe est ensuite séchée.

On peut être styliste, se préoccuper de la résistance aux antibiotiques, et imprégner couvertures et robes de bactéries inactivées. La *VRSA Dress* est un moyen de sensibiliser le public à la résistance sans cesse accrue des souches de staphylocoques aux antibiotiques (voir chapitre 8). VRSA est en effet l'acronyme de *Vancomycin-Resistant Staphylococcus aureus*.

On peut être à la fois ingénieur, designer et biotechnologiste, et inventer un lustre photosynthétique. Dans la création *Exhale*, 70 feuilles de verre sont remplies d'algues vertes qui absorbent le dioxyde de carbone et produisent de l'oxygène. Un liquide circule dans le verre pour nourrir les algues.

On peut être à la fois microbiologiste et peintre, et réaliser des minitableaux microbiens en faisant se développer des bactéries colorées sur milieux solides. Les dessins microbiens sont ensuite figés dans une résine. La Société américaine de microbiologie (ASM) promeut ce nouvel art en organisant l'*ASM Agar Art Contest*. En 2018, une section pour les artistes en herbe (moins de 12 ans) sera même ouverte.

On peut être microbiologiste et photographe, et inventer la bactériographie. Des bactéries sont ensemencées sur un milieu de culture. Certaines sont tuées par des rayonnements appliqués à travers un négatif. Les portraits bactériens dessinés par les bactéries survivantes se révèlent en 48 h.

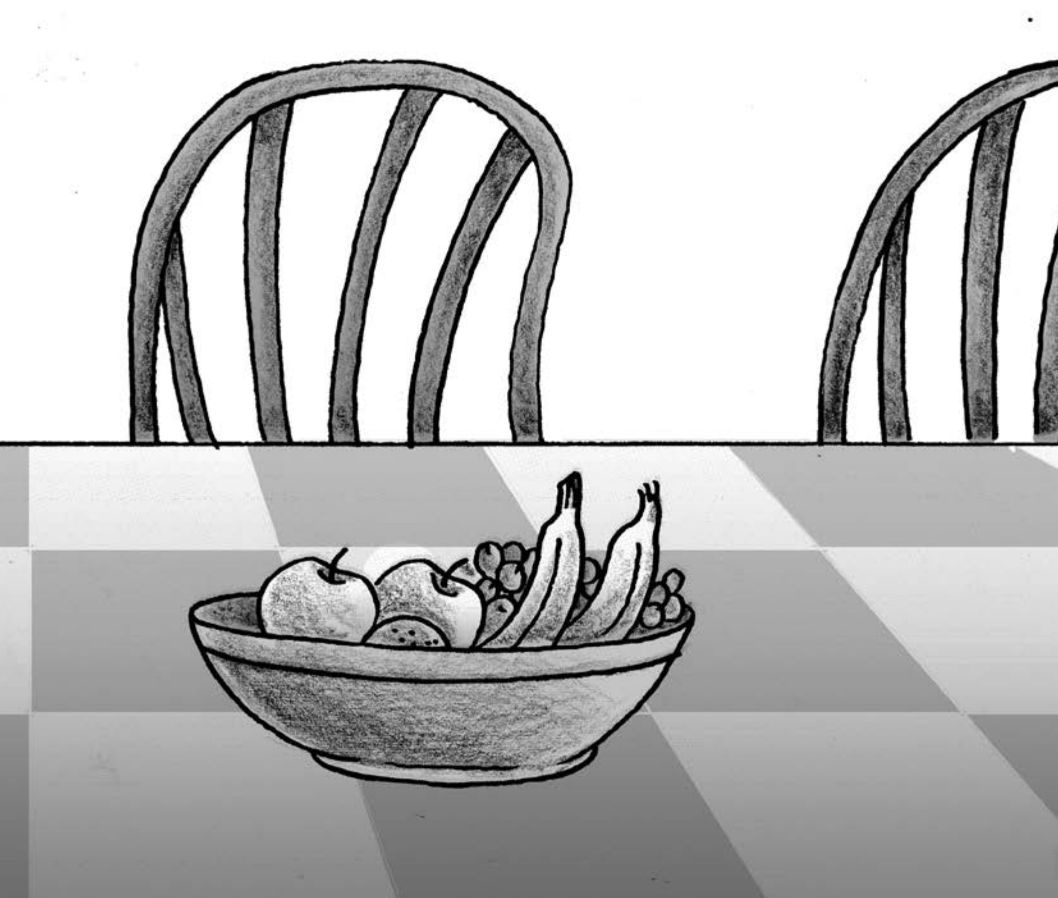
On peut être créatrice, avoir un mari microbiologiste, et s'inspirer des formes et des couleurs microbiennes pour créer de superbes bijoux. On peut être l'ami de cette artiste et s'inspirer des biofilms pour créer de magnifiques tableaux.

On peut s'appeler Flore, se vouloir trapéziste ou journaliste, ignorer presque tout des microbes, et pourtant se laisser inspirer par leurs drôles de créations.



7
JULIE, LA JEUNE MÈRE DE FAMILLE

Où l'on démystifie les « cas à risque » en expliquant les évictions et les précautions à respecter pour les femmes enceintes, les bébés et les jeunes enfants, sans toutefois tomber dans la surprotection. Où l'on revient sur quelques pathogènes alimentaires et leurs moyens de maîtrise.



Julie est la jeune sœur de Valérie et la tante de Louise. En ce moment, une grande partie de son attention est accaparée par son fils, Valentin. C'est son premier enfant. Il a 6 mois.

À 10 heures, Julie lui donne une collation et profite de ce moment de partage. Enfin, essaie de profiter… en veillant à ce que le chien et ce qu'il véhicule ne viennent pas les importuner.

Une hypersensibilité de femme enceinte

Comme chez toutes les mères, une des préoccupations majeures de Julie est de veiller à la santé et au bien-être de son enfant. Alors, dès qu'elle a su qu'elle était enceinte, elle s'est renseignée sur ce qu'elle pouvait faire et ne pas faire. Julie l'a entendu de multiples fois : être enceinte n'est pas une maladie. C'est vrai. Néanmoins, durant cette période, les défenses immunitaires diminuent pour permettre l'implantation et le développement du fœtus. Les femmes enceintes sont ainsi plus sensibles aux rhinopharyngites hivernales, et aussi éventuellement aux maladies d'origine alimentaire.

Julie n'a pas réellement perçu la baisse de son immunité, mais elle a consciencieusement veillé à renforcer l'hygiène lors de la préparation et la conservation des aliments. Elle a fait comme d'habitude… avec plus de soin. Elle se lavait plus souvent et plus longtemps les mains : en sortant des toilettes, en rentrant du métro, après avoir jardiné, avant de cuisiner et chaque fois qu'elle manipulait des aliments crus (végétaux ou animaux, les deux pouvant être vecteurs de germes pathogènes). Son réfrigérateur et son plan de travail étaient impeccables. Toute souillure était immédiatement nettoyée. Elle faisait une chasse drastique aux aliments périmés et respectait scrupuleusement la séparation des aliments crus et cuits (dans le frigo, sur les planches à découper et les plats de service). D'ailleurs, elle ne mangeait plus guère d'aliments crus.

Fini les tartares, sushi et autres taramas. *Exit* les graines germées type fenugrec. De nombreux microbes pathogènes peuvent conta-

Des précautions sanitaires spécifiques au poisson

Le poisson a de nombreux avantages nutritionnels. Mais il est aussi une source de dangers chimiques (métaux lourds par exemple) et microbiologiques, notamment du fait de nouvelles pratiques culinaires telles que la consommation de plus en plus fréquente de poisson cru. Pour lutter contre le parasite *Anisakis*, qui contamine les poissons de mer sauvages, les produits destinés à être consommés crus ou peu transformés (fumés à froid par exemple) doivent être congelés à – 20 °C pendant 24 h (règlement européen CE/853/2004). Les larves ainsi détruites restent allergènes, mais elles ne peuvent plus donner d'anisakidose, infection se manifestant dans les formes graves par un syndrome pseudo-ulcéreux à l'estomac ou une occlusion intestinale.

Dans les produits industriels sous atmosphère modifiée, pour éviter le développement de *Clostridium botulinum* type E (un contaminant des poissons se développant au froid, et dont la toxine est mortelle), une portion d'oxygène doit être maintenue (les *Clostridium* sont anaérobies stricts et ne se développent qu'en l'absence d'air). Le *Guide des bonnes pratiques d'hygiène du restaurateur* précise d'ailleurs que « le conditionnement sous vide des poissons crus en vue de leur conservation est à proscrire ». Qu'en est-il alors des « machines sous vide » à usage domestique ? La diminution de la teneur en oxygène qu'elles permettent est probablement insuffisante pour les bactéries anaérobies strictes, mais elle peut favoriser les bactéries aéroanaérobies, dont des bactéries histaminogènes. Ces dernières transforment l'histidine (présente en quantité importante dans certains poissons) en histamine à l'origine de réactions pseudo-allergiques. Une fois l'histamine produite, elle n'est pas détruite par la cuisson.

miner les végétaux, les viandes et les poissons. La plupart sont détruits par la cuisson, qui constitue un moyen de maîtrise privilégié. Julie aime la salade et les crudités. Elle ne les a pas supprimées de son alimentation pendant neuf mois, mais elle consommait les légumes aussitôt achetés, après les avoir lavés très soigneusement, et pelés lorsque c'était possible.

9 mois sans rillettes ni mousse au chocolat

Le plus dur pour Julie durant sa grossesse a été de se priver de mousses au chocolat maison. C'est un de ses péchés mignons. Les

œufs crus ou peu cuits, les produits à base d'œufs crus (mayonnaise et mousse au chocolat maison) et les viandes de volaille mal cuites peuvent transmettre des salmonelles. Ces microbes sont responsables de gastro-entérites aux conséquences parfois graves chez les futures mamans. Pourquoi ce lien privilégié salmonelles-volailles/œufs ? Les salmonelles peuvent coloniser le tractus intestinal des poules et leur appareil reproducteur, se retrouvant ainsi sur et dans l'œuf. Mais le lavage des œufs est à éviter, car il perméabilise la coquille et favorise l'internalisation des bactéries surfaciques. Les œufs sont donc à conserver sales — avec parfois des traces visibles et des plumes —, et il faut bien entendu les séparer des autres aliments (d'où le réceptacle prévu à cet effet dans le frigo).

Le risque de salmonellose ne vient pas tant des aliments industriels (les élevages aviaires sont surveillés, l'absence de salmonelles est un critère de sécurité à respecter pour de nombreux aliments, les œufs utilisés dans les produits industriels sont pasteurisés) que de ceux artisanaux ou élaborés à la maison. Lorsque ma fille aînée avait 2 ans, je lui ai réservé le seul œuf de ferme que j'avais dans mon frigo pour lui faire un bel œuf sur le plat, bien jaune. Elle a malheureusement attrapé une salmonellose avec diarrhée sanglante, dont elle a guéri sans antibiotiques, mais avec une surveillance poussée pour éviter une éventuelle déshydratation. La maîtrise des salmonelles dans la chaîne de production alimentaire progresse, mais on craint l'émergence de souches multirésistantes aux antibiotiques et, de manière plus anecdotique, la contamination par des animaux de compagnie un peu particuliers : les reptiles et les amphibiens.

Cela a aussi été frustrant pour le mari de Julie, qui fut solidaire lorsqu'elle s'est privée de fromages à pâte molle, de rillettes et autres pâtés. Et quand il a fallu fêter Noël sans saumon fumé ! Ce jour-là, le plateau de fromages a néanmoins retrouvé ses droits, et Julie s'est autorisé un bout de camembert dont elle a enlevé la croûte. Toutes ces précautions étaient importantes pour la prémunir, ainsi que le

futur bébé, contre *Listeria monocytogenes*, laquelle peut traverser la barrière placentaire et entraîner une mortalité *in utero* et un avortement. Si la mère est atteinte de listériose, le nourrisson peut aussi être contaminé lors de la naissance ; ces infections néonatales mènent à la mort dans 20 % des cas.

Listeria monocytogenes est une bactérie très fréquente de l'environnement. On la trouve partout. Sur les végétaux, dans la terre, dans le lait, sur les surfaces des ateliers et des machines (comme les trancheuses). Elle peut contaminer la matière première, mais aussi le produit fini. Autre caractéristique problématique : elle se développe aux températures de réfrigération. De nombreux produits prêts à consommer (c'est-à-dire sans étape de cuisson avant consommation) sont ainsi à risque par rapport à *Listeria monocytogenes*, plus particulièrement s'ils ont une date limite de consommation (DLC) longue qui laisse le temps à la bactérie de se développer. Potentiellement très grave chez les personnes sensibles, la listériose reste cependant très rare : de l'ordre de 300 cas en France par an, tous malades confondus.

Faut-il avoir peur du chat ?

Comme toutes les femmes enceintes, Julie a passé un test pour savoir si elle était immunisée contre la toxoplasmose, une maladie due à *Toxoplasma gondii* qui peut infecter le fœtus. Julie était immunisée.

Le parasite *Toxoplasma gondii* effectue sa reproduction sexuée chez les chats, qui excrètent des oocystes (œufs encapsulés) résistants dans l'environnement. D'où des précautions à prendre par les femmes non immunisées vis-à-vis des chats. Ingérés par des mammifères ou des oiseaux, les oocystes se transforment en formes infectantes. Ces dernières soit sont éliminées par la réponse immune, soit s'enkystent dans les muscles, le cerveau ou les yeux. Une fois dans un hôte, *Toxoplasma gondii* peut prendre le pouvoir. Chez les souris, il provoque une attraction pour les urines de chats. Elles se font ainsi plus aisément attraper, ce qui facilite le cycle parasitaire. Des

modifications subtiles peuvent aussi être observées chez l'homme ou la femme contaminés, cependant la toxoplasmose humaine reste la plupart du temps asymptomatique. Mais, contractée pendant la grossesse, elle est potentiellement grave. Le parasite peut passer la barrière placentaire et infecter le fœtus, avec des risques de malformations cérébrales et de décès. Le test (sérologie) mensuel effectué chez les femmes enceintes non immunisées permet de détecter une contamination acquise pendant la grossesse.

La découverte de l'infection manuportée au XIXe siècle

Valentin est né à la maternité. Julie y a été admise à 6 heures du matin. Valentin a poussé son premier cri à 10 heures. Pas de complications et un accouchement rapide. Au XIXe siècle, la situation était bien différente. Retour en arrière.

En 1846, Ignace Semmelweis est assistant-professeur à la maternité de Vienne dans le service du professeur Klein. On meurt beaucoup dans ce service. Jusqu'à 30 % des femmes venues pour accoucher succombent d'une infection post-partum nommée « fièvre puerpérale ». C'est d'autant plus ennuyeux que, dans un service d'obstétrique voisin, la mortalité n'est que de l'ordre de 1 %. Et pourtant, ce ne sont que des sages-femmes qui officient, et elles sont forcément moins savantes que les élèves médecins du professeur Klein ! Mais si le problème venait justement de ces élèves médecins, qui pratiquent sans précautions, l'un après l'autre, dissection et accouchement ?

En imposant le lavage des mains au chlorure de chaux et la désinfection des instruments opératoires, Semmelweis réduisit la mortalité à 3 %. Il venait de découvrir les infections nosocomiales, avant que Pasteur démontre l'existence des microbes. Il prouva l'importance du lavage des mains, mais fut incompris : « Nous transportons sur nos mains des petites choses… Quelles sont ces petites choses qu'aucun œil ne peut voir ? C'est ridicule. Les petites choses de monsieur Semmelweis n'existent que dans son imagination. » Semmelweis tomba dans l'oubli. Louis Ferdinand Destouches — alias Céline — lui consacra néanmoins sa thèse de médecine. « Quand on fera l'histoire des erreurs humaines, on trouvera difficilement des exemples de cette force, et on restera étonné que des hommes aussi compétents, aussi spécialisés puissent, dans leur propre science, demeurer aussi aveugles, aussi stupides. »

Du fait des changements alimentaires et du mode de vie, de moins en moins de femmes en âge de procréer sont immunisées contre la toxoplasmose (37 % en 2011, contre 54 % en 1995), ce qui entraîne des besoins de surveillance accrus. En dehors d'une piqûre mensuelle, les femmes non immunisées n'ont heureusement pas énormément de contraintes supplémentaires. En effet, pour prévenir une contamination par *Toxoplasma gondii*, on retrouve des précautions communes à d'autres microbes : ne pas consommer de viande crue qui peut héberger des kystes du parasite ; bien laver tout ce qui a été en contact avec de la terre (fruits tombés au sol, légumes consommés crus), car on peut y trouver des oocystes du parasite, notamment émis par les chats. S'y ajoute le fait de ne pas consommer de saucisson, car ce produit de salaison fermenté est protégé de nombreux microbes (voir chapitre 9), mais pas du parasite. Dernière précaution, confier le changement de litière du matou bien-aimé à une tierce personne. Dès lors, nul besoin de bannir le chat !

Précautions alimentaires, du premier au quatrième âge

Julie sourit à Valentin. Elle s'émerveille devant son bébé. Il a bien grandi depuis sa naissance, mais il lui paraît encore si fragile. Il dépend tellement d'elle ! Elle veille sur lui et le fera encore longtemps, avec des précautions qui varieront avec l'âge.

Julie commence tout juste la diversification alimentaire de Valentin, qui est donc essentiellement nourri au biberon après avoir été allaité jusqu'à 4 mois. S'il n'y a pas besoin de stériliser le biberon comme cela a longtemps été préconisé, il existe cependant certaines précautions à prendre. Le lait en poudre est un aliment sec non stérile dans lequel les microbes ne se développent pas, mais survivent. Dans les années 1990, *Cronobacter sakazakii* a d'ailleurs émergé comme un contaminant des poudres de lait responsable d'infections néonatales graves (entérocolites nécrosantes, septicémies et méningites). Ne pas préparer les biberons à l'avance (moins de 1 heure avant consommation, en cas de stockage à température ambiante)

reste le meilleur moyen pour lutter contre le développement de *Cronobacter sakazakii* et d'autres microbes. Fin 2017, c'est *Salmonella* qui fait parler d'elle et entraîne le rappel de plusieurs lots de lait en poudre.

Autre précaution importante : si l'enfant a moins de 1 an, ne pas lui donner de miel, ni pour sucrer ses biberons ni pour calmer un mal de gencive, un mal de gorge ou une colique. Le miel contient parfois des spores de *Clostridium botulinum* qui peuvent se développer dans l'intestin des jeunes enfants et y produire une toxine responsable de botulisme infantile. Cette forme de botulisme, rarement mortelle, entraîne néanmoins une longue période d'hospitalisation sous assistance respiratoire. Chez l'adulte, le système immunitaire est armé pour combattre ce microbe, et seules les toxines préformées dans l'aliment sont dangereuses.

Julie plonge une cuillère dans la compote de Valentin. Malgré sa gourmandise, elle se retient de la goûter. Elle a raison, elle risquerait alors de transmettre des microbes buccaux à son fils.

Plus âgé, Valentin raffolera probablement de hamburger, ketchup et autres frites. Pas question pour Julie de le priver de ce plaisir… de temps en temps. Mais il lui faudra alors faire attention à la cuisson des steaks hachés. Un enfant est plus sensible qu'un adulte à *Escherichia coli* O157:H7, un contaminant fréquent de la viande de bœuf qui peut provoquer, dans les cas les plus graves, une insuffisance rénale aiguë et des atteintes neurologiques (le syndrome hémolytique urémique est rare, mais il existe). En juin 2017, le tribunal condamnait à trois ans de prison (dont deux de prison ferme) l'ancien gérant d'une fabrique de steaks hachés dont la contamination avait rendu malades 18 personnes en 2011.

Comment gérer le danger *Escherichia coli*, notamment dans les cantines scolaires ? Le plus simple aurait été de déconseiller, voire interdire, les hachés de bœuf. Cette solution n'a pas été retenue. Une note ministérielle précise que « compte tenu de la source précieuse de protéines qu'il représente, et dans le cadre d'une alimentation

diversifiée, il n'est pas souhaitable d'éliminer des menus le steak haché. Mais il faut impérativement, pour les consommateurs sensibles, [le] cuire à cœur » ; elle rapporte qu'« une méthode simple pour s'assurer que les barèmes sont suffisamment respectés est de vérifier visuellement que la viande n'est plus rosée à cœur ».

Lorsque l'homme devient adulte, son système immunitaire est à son optimum pour lutter contre les infections, sauf cas particulier (immunodépression). Puis, avec la vieillesse, il rejoint une autre population à risque et doit veiller à son alimentation.

« À consommer cuit à cœur »

On trouve sur l'emballage des lardons et des steaks hachés des indications qui nous incitent à les cuire. Pour la viande de porc, on se méfie du ténia, un parasite qui se loge dans le muscle. Pour la viande de bœuf, on craint plus particulièrement *Escherichia coli* O157:H7. Cette bactérie, naturellement présente dans le tractus intestinal des bœufs, ne rend pas ces derniers malades. Mais elle peut contaminer la surface de la viande lors de l'abattage. La cuisson détruit toute contamination de surface, même pour un steak « bleu ». Par contre, pour anéantir les microbes pris dans la masse d'un haché, celui-ci doit être cuit à cœur.

Et les hachés de bœuf surgelés ? La congélation stabilise les bactéries, mais ne les détruit pas. Ils sont donc à consommer cuits à cœur également, après une cuisson sans décongélation ou une décongélation au frigo.

Il ne faut pas décongeler un aliment à température ambiante. Car, dès que la température augmente, la multiplication microbienne reprend d'autant plus aisément que les microbes utilisent les exsudats libérés des cellules de l'aliment, cassées par congélation. « Mais, si je cuis après décongélation, je ne risque rien, puisque je détruis ! » C'est faux. Tout barème de destruction n'est valable que pour une contamination initiale donnée. S'il y a beaucoup de microbes, il en reste une partie. À moins d'augmenter le temps et/ou la température de cuisson.

Valentin fait aujourd'hui partie d'une population fragile… mais pas à mettre sous couveuse. Julie le sait. Mais a-t-elle conscience de la nécessité des contacts entre Valentin et les microbes environnementaux pour le bon développement de son fils ?



8
VALENTIN, LE BÉBÉ

Où l'on observe plus en détail le microbiote intestinal et ses liens avec le système immunitaire. Où l'on découvre comment fonctionnent d'anciennes méthodes ou de nouvelles thérapies à base de microbes pour maîtriser de nombreuses maladies : vaccins, antibiotiques, virothérapie, phagothérapie, thérapie génique et… don de fèces.



Valentin a 6 mois. Son monde, c'est beaucoup Julie. S'il crie, elle accourt. Lorsqu'il babille, elle s'émerveille, et elle répond au moindre de ses sourires. Avec ses mimiques, il lui fait comprendre quand il a faim et quand il est fatigué.

À 10 heures, Valentin mange distraitement — une cuillérée par-ci, une cuillérée par-là —, tout en observant un environnement qui l'intéresse de plus en plus. Y voit-il des microbes ?

Ses tout premiers microbes !

Valentin est né à terme. 3,2 kg pour 50,5 cm. Pendant neuf mois, il a attendu de découvrir le monde, à l'abri dans le liquide amniotique. Le placenta filtrait la plupart des éléments toxiques. Certains virus (ceux de la rubéole, de la varicelle et de l'herpès), le parasite *Toxoplasma gondii* et la bactérie *Listeria monocytogenes* auraient néanmoins pu le franchir, mais Julie veillait.

Quand Valentin a-t-il rencontré ses premiers microbes ? Selon certains chercheurs, la transmission de bactéries de la mère au fœtus serait un phénomène fréquent — universel ? — chez les animaux. À titre d'exemple, des souris gravides à qui on a fait ingérer des bactéries ont mis au monde des souriceaux dont les premières selles (le méconium) contenaient ces mêmes bactéries. Il existe donc une transmission microbienne intra-utérine chez les souris. En serait-il de même chez les humains ? Probablement. On a d'ailleurs trouvé de l'ADN bactérien dans les placentas humains.

Quoi qu'il en soit, Valentin a rencontré des microbes avant de voir le jour quand, au moment de sa naissance, il a traversé le canal pelvi-génital. Ces microbes ont participé à la constitution de ses premiers microbiotes, semblables au microbiote vaginal de sa mère. S'il était né par césarienne, ses microbiotes initiaux auraient ressemblé à des microbiotes cutanés d'adultes. Cette différence a-t-elle un impact sur l'évolution future des enfants ? C'est une hypothèse à

l'étude, d'autant plus qu'il semble y avoir des taux accrus d'asthme chez les enfants nés par césarienne, et peut-être aussi de dermatites atopiques, d'allergies alimentaires et de diabète — toutes maladies en lien avec le système immunitaire.

Le microbiote intestinal de Valentin est en pleine évolution. Une fois le bébé né, l'expulsion du méconium permet la colonisation intestinale. Les premiers microbes à s'installer respirent l'oxygène, l'éliminent de l'intestin et permettent l'implantation des anaérobies stricts. Ensuite, le microbiote des nouveau-nés varie en fonction de facteurs exogènes (exposition aux microbes environnementaux, type d'alimentation, prise de médicaments) et endogènes (pH intestinal, acides biliaires, sécrétions du tube digestif, métabolites produits par les premiers microbes). Les populations de microbes se succèdent puis, entre 2 et 4 ans, le microbiote intestinal se stabilise jusqu'à la soixantaine, où il redevient fluctuant et s'appauvrit.

Le microbiote intestinal, une « signature microbienne »

Si l'on considère les bactéries majoritaires dans les intestins humains, on distingue trois entérotypes principaux, qui ne sont pas fonction de l'âge ou de l'ethnie, mais des habitudes alimentaires. L'entérotype 1 est dominé par des *Bacteroides*. Il est lié à un régime alimentaire riche en acides gras saturés et en protéines : c'est majoritairement celui des Américains et Européens mangeurs de viande. L'entérotype 3 est aussi fréquent en Occident ; il se retrouve chez les individus ayant des régimes riches en graisses polyinsaturées et en alcool ; ses bactéries majoritaires appartiennent au genre *Ruminococcus*. Enfin, l'entérotype 2 contient en majorité des *Prevotella* et prédomine chez les individus, souvent des ruraux, qui consomment davantage de fibres et de sucres.

Même si nous pouvons être « rangés » dans un de ces grands groupes, la variété des souches qui composent notre microbiote intestinal et leur proportion nous sont en grande partie propres, tout comme celles de nos microbiotes cutanés et pulmonaires. Sauf cas particulier (maladie chronique, trouble du système immunitaire, changement durable d'alimentation), le microbiote intestinal revient par homéostasie à sa composition d'équilibre après une perturbation (traitement par antibiotiques, par exemple).

Gargouillis, intestins et microbes

Valentin se tortille. Il n'a pas mal au ventre, ce qui lui arrive parfois, comme à de nombreux bébés, mais son ventre gargouille. Est-ce le fait de son microbiote intestinal qui peaufine ses colocataires ?

Le microbiote intestinal est le microbiote le plus étudié actuellement chez l'homme. Il est quantitativement et qualitativement important. On lui attribue maintenant une abondance de l'ordre de 4×10^{13} bactéries, à comparer aux 10^{12} bactéries du microbiote cutané. Ses fonctions, démontrées ou supposées, sont multiples. Il participe au maintien de la barrière formée par les muqueuses du tube digestif. Il empêche la colonisation du tube digestif par des pathogènes en leur faisant concurrence pour les nutriments et les sites où ils pourraient s'implanter, en produisant des molécules antimicrobiennes, et en stimulant les cellules des muqueuses pour la production de tels composés.

Un drôle de médicament

Le microbiote intestinal joue de nombreux rôles primordiaux chez l'homme. On peut le « booster » en ingérant des probiotiques (microbes vivants) ou des prébiotiques (nutriments pour microbes). Aujourd'hui, on pratique aussi la transplantation fécale d'individus sains à des malades. Le microbiote contenu dans les fèces est alors considéré comme un médicament, dont l'utilisation est soumise aux recommandations de l'ANSM.

Depuis 2014, la transplantation fécale fait partie des stratégies recommandées pour traiter les infections multirécidivantes à *Clostridium difficile*, lesquelles peuvent apparaître suite à une antibiothérapie. L'ANSM considère que « d'autres pathologies représentent des cibles potentielles, telles que les maladies inflammatoires chroniques de l'intestin, les troubles fonctionnels intestinaux, l'obésité, les maladies métaboliques et auto-immunes, les désordres neuropsychiatriques ».

Après le don du sang et le don d'organes, voici donc venu le don de fèces. Moins invasif pour le donneur, mais ce dernier doit tout autant répondre à des critères précis avant d'être déclaré apte.

Le microbiote intestinal transforme et extrait l'énergie des lipides, gaz et sucres du côlon. Il participe à la synthèse des vitamines B et K, à la régulation de l'absorption des acides gras, du calcium et du magnésium, et à la dégradation de composés toxiques. Son dysfonctionnement pourrait d'ailleurs jouer un rôle dans l'obésité et les maladies métaboliques comme le diabète.

Le microbiote intestinal n'est pas utile qu'au seul système digestif : les molécules qu'il produit vont se répandre dans tout le corps et être impliquées dans le dialogue intestin-cerveau (il produit des neurotransmetteurs, tout comme les cellules du cerveau), dans celui que l'on découvre actuellement entre intestin et poumon (notamment par la production de cellules immunitaires), dans certaines réactions cutanées, et probablement dans bien d'autres que l'on n'imagine pas encore.

Allergènes, immunité et microbes

Valentin sursaute. Il vient d'entendre Youpi japper. Julie espère que sa sœur a bien prévu de le laisser dehors. Elle n'aimerait pas que Valentin soit en contact avec le chien. On ne sait jamais ce qui peut se passer dans la tête d'un animal. Et puis tous ces poils qui volent…

Certaines personnes sont allergiques aux poils de chiens ou de chats. Cependant, selon une étude parue en avril 2017, la présence d'un chien abaisserait le risque d'allergie infantile. Exposer Valentin à Youpi — et aux microbes qu'il véhicule — est peut-être bon pour son système immunitaire. Nous avons évoqué, dans le chapitre 2, la théorie de la biodiversité (dite aussi « théorie hygiéniste »), vieille d'une vingtaine d'années, selon laquelle un manque d'exposition aux microbes pendant l'enfance favoriserait le développement d'allergies. Elle tend à se confirmer, même si les résultats des études sont parfois contradictoires.

Nous avons des quasi-certitudes : les lymphocytes T (cellules du système immunitaire adaptatif) se mettent en action lorsque des

Des souris et des hommes

Les fonctions des microbiotes sont multiples. Deux grandes méthodes sont généralement utilisées pour les déterminer : la mise en corrélation statistique entre une dysbiose (perturbation du microbiote) et une maladie ; les expérimentations sur des souris sans microbes (axéniques).
Ces souris ne sont pas comme les autres, et les différences révèlent les rôles des microbiotes. Si l'on se cantonne au domaine de l'immunité, les souris axéniques ont une rate et des ganglions lymphatiques atrophiés. Elles présentent une sensibilité accrue aux infections (digestives, pulmonaires, etc.), et leurs mécanismes de contrôle de l'inflammation et de l'auto-immunité sont dérégulés.
On peut implanter aux souris axéniques des microbes spécifiques ou un écosystème microbien complexe (comme un microbiote humain fécal) pour en déterminer l'impact. Bien sûr, nous ne sommes pas des souris, et ce qui est vrai ou bon pour elles ne l'est pas forcément pour nous. Les souris sont des modèles qui, comme tout modèle, doivent être validés.

intrus sont détectés afin de les éliminer ; les lymphocytes T activés en présence de bactéries sont différents de ceux activés par les parasites, les acariens et les molécules allergènes comme le pollen ; l'action incontrôlée des premiers conduit aux maladies auto-immunes, celle des seconds, à l'asthme et aux autres allergies. Des hypothèses sont également formulées : certains scientifiques pensent aujourd'hui que les cellules immunitaires impliquées dans la maîtrise des bactéries ont aussi un effet inhibiteur sur celles impliquées dans l'allergie. Un peu comme si le système immunitaire, trop occupé à contenir les bactéries, laissait de côté les allergènes.

C'est dans l'enfance, lors de la maturation du système immunitaire, que ce phénomène prend toute son importance. Dès les premiers instants de la vie, le microbiote éduque le système immunitaire. Ce non-soi s'installe et est accepté par le système immunitaire du nouveau-né. Il « apprend » ainsi aux différentes composantes du système immunitaire à faire la distinction entre les bons (le microbiote) et les mauvais (les intrus) microbes. Le microbiote

intestinal semble ici encore être important. Ce n'est pas étonnant, puisqu'on trouve dans l'intestin environ 70 % de nos cellules immunitaires. Le microbiote intestinal régule l'activité des lymphocytes impliqués dans l'inflammation et module l'expansion et la migration des lymphocytes T extra-intestinaux.

Des vaccins trop efficaces ?

Valentin termine sa compote et regarde Julie d'un air repu. Ses joues rouges indiquent des dents à venir. Comme il vient d'être vacciné, Julie vérifie quand même en lui touchant le front qu'il n'a pas de fièvre. Parfait. Tout est bien.

Julie suit les recommandations de son pédiatre et elle a fait vacciner Valentin contre le méningocoque C. Le principe de la vaccination est simple : une version atténuée (ou certaines parties) de l'agent pathogène ou de ses toxines est injectée. Le système immunitaire de l'organisme vacciné détecte les intrus et produit notamment des anticorps, qui faciliteront la défense en cas de nouveau contact. Protection individuelle, la vaccination a aussi une portée collective : lorsque suffisamment de personnes sont vaccinées dans une population, les maladies ne peuvent pas s'y propager, et ceux qui ne peuvent pas être vaccinés sont ainsi protégés.

La couverture vaccinale nécessaire à la protection collective dépend de chaque maladie, mais elle est généralement élevée. Par exemple, le ministère des Solidarités et de la Santé stipule que « l'augmentation de la couverture vaccinale à deux doses des enfants avant l'âge de 2 ans (qui doit atteindre au moins 95 % pour la première dose et 80 % pour la seconde), l'administration plus précoce de la seconde dose et le rattrapage des sujets réceptifs (adolescents et jeunes adultes nés depuis 1980) devraient permettre à terme l'interruption de la transmission de la rougeole et de la rubéole ».

Nous autres, Français, sommes les troisièmes plus gros consommateurs d'antibiotiques d'Europe. En même temps, plus de 20 % des Français n'étaient pas favorables à la vaccination en 2016 (ils étaient moins de 10 % en 2000 ; enquête Baromètre Santé 2016 réalisée par Santé publique France), et 40 % mettent en cause la sûreté des vaccins, contre 17 % pour l'ensemble des Européens (résultats du *Vaccine Confidence Project* publié fin 2016). Préférerions-nous guérir que prévenir ? Sûrement pas. Mais les vaccins font l'objet de polémiques sur fond d'intérêts économiques, et leur balance bénéfice/risque est difficile à établir. D'ailleurs, que penser du passage de trois à onze vaccins obligatoires pour les nouveau-nés à partir de janvier 2018 ? Il peut trouver sa justification dans l'observation, rapportée en juillet 2017 par l'Institut de veille sanitaire (InVS), que la couverture vaccinale n'est pas suffisante pour les maladies non obligatoires comme « la rougeole et les infections à méningocoque C […] entraînant la survenue de cas graves liés à ces maladies qui auraient pu être évités ».

Les vaccins sont victimes de leur succès. Leur efficacité fait qu'on a l'impression qu'ils ne servent à rien. Quelle est la dangerosité de ces maladies contre lesquelles ils protègent et dont on n'entend que peu parler ? La crainte des effets secondaires éventuels devient alors plus grande que celle des maladies potentielles. L'OMS estime que 3 millions de personnes meurent dans le monde par an pour ne pas avoir bénéficié de vaccination, et que les vaccins en sauvent 3 autres millions. Et seule la vaccination a permis l'éradication de la variole. Ainsi, les nouvelles générations n'en meurent plus et n'ont plus besoin d'être vaccinées.

L'antibiorésistance, une épée de Damoclès

Julie est une maman chanceuse. Son fils n'a été que peu malade lors des six premiers mois. Une seule otite. À part cela, parfois un peu de fièvre due à une petite virose pour laquelle le médecin n'a

pas prescrit d'antibiotiques. Julie le sait : les antibiotiques ne sont pas automatiques ! Ils ne s'utilisent qu'en cas de surinfections bactériennes.

Lors de leur découverte au début des années 1930, les antibiotiques ont révolutionné les pronostics de maladies. Ils sauvent toujours des vies. Malheureusement, eux aussi sont victimes de leur succès. Comme les vaccins, mais dans un autre contexte. Leur utilisation excessive (dans le cadre de maladies virales), parfois pour de mauvaises raisons (comme pour favoriser la croissance des animaux d'élevage, ce qui est interdit depuis 2006 en Europe), et le non-respect des posologies (dû entre autres à l'abandon précoce des traitements antibiotiques par les patients) ont participé à la sélection de souches antibiorésistantes.

La lutte contre l'antibiorésistance est une course sans fin. Dans les années 1945, les souches de *Staphylococcus aureus* étaient sensibles à la pénicilline, puis elles sont devenues résistantes. On a alors traité *Staphylococcus aureus* à la méticilline. Et des souches SARM (*Staphylococcus aureus* résistants à la méticilline) sont apparues. Puis vint la vancomycine, et depuis une quinzaine d'années, on trouve des SARV (*Staphylococcus aureus* résistants à la vancomycine). Ces bactéries, responsables de panaris, de furoncles (dits aussi « anthrax staphylococcique », à ne pas confondre avec l'anthrax des Anglo-Saxons, ou maladie du charbon de *Bacillus anthracis*), d'infections des os, voire de septicémies, sont donc devenues extrêmement difficiles à éradiquer, notamment dans les hôpitaux, où elles sont responsables d'infections nosocomiales.

L'OMS s'inquiète et dresse, en février 2017, la liste des douze familles de bactéries les plus menaçantes pour la santé humaine du fait de leur résistance. Responsables de 12 500 morts par an en France, elles sont particulièrement critiques dans les hôpitaux et les maisons de retraite. L'OMS tente de promouvoir le développement de nouvelles molécules antibiotiques sans lesquelles les

médecins risquent de se retrouver, de plus en plus souvent, devant une impasse thérapeutique.

De nouveaux modèles économiques, basés notamment sur des partenariats public/privé, sont à imaginer pour permettre la mise sur le marché de telles molécules. En effet, les développer n'est pas rentable. Cela demande une dizaine d'années de recherche et développement, pour un coût de l'ordre du milliard d'euros. Aucun retour sur investissement ne peut être attendu : ces antibiotiques doivent rester « ceux de la dernière chance », et n'être utilisés — et donc commercialisés — que lorsque tous les autres se sont révélés inefficaces. C'est seulement ainsi qu'ils peuvent prétendre échapper au phénomène d'adaptation bactérienne qui a fait perdre leur efficience à leurs prédécesseurs.

Vive les virus !

Julie n'est pas « pro-antibiotiques ». Cependant, lorsque Valentin en a eu besoin pour son otite, elle n'a pas hésité. Et l'otite a disparu sans complication. Mais existe-t-il des alternatives en cas de microbes résistants ?

Pourquoi ne pas utiliser les bactériophages ? Bactériophage signifie littéralement « qui se nourrit de bactéries ». Ces virus infectent les bactéries cibles, qu'ils détruisent. La phagothérapie a été utilisée au début du XXe siècle jusqu'à la découverte des antibiotiques, plus rapides et très efficaces. Les bactériophages font actuellement l'objet d'un regain d'intérêt, notamment pour soigner les infections pulmonaires à *Pseudomonas aeruginosa* des personnes atteintes de la mucoviscidose, et les infections à *Pseudomonas aeruginosa* et *Escherichia coli* des grands brûlés. Depuis 2011, les phages sont classés comme médicaments et doivent faire l'objet d'une autorisation de mise sur le marché (AMM). La mise en place d'essais cliniques est envisagée pour certains phages, mais aucun n'est encore autorisé pour soigner des infections en France, contrairement à ce que l'on observe en Russie ou en Géorgie.

Microbes contre microbes

Les stratégies de lutte contre les microbes font souvent intervenir… des microbes. En effet, les microbiotes remplissent entre autres une fonction de barrière, comme nous l'avons vu. Avec l'écologie microbienne dirigée, l'implantation de « bons » microbes sur des surfaces (fromages, planches d'affinage) empêche leur colonisation par des pathogènes. La phagothérapie est un autre exemple d'application du « microbe contre microbe », ainsi que la vaccination et les antibiotiques.

Dans la vaccination, on habitue le corps en le mettant en contact avec un microbe, dans des conditions maîtrisées. Dans les années 1795, le médecin anglais Edward Jenner comprit que les valets de ferme en contact avec la vaccine (une variante de la variole touchant les vaches) s'immunisaient contre la variole. Les premiers vaccins étaient nés. Louis Pasteur améliora les techniques d'atténuation des bactéries et des virus et vaccina, le 6 juillet 1885, Joseph Meister, un enfant mordu par un chien enragé. Depuis, la vaccination n'a cessé d'être utilisée, permettant l'éradication totale de la variole et à 99 % de la poliomyélite.

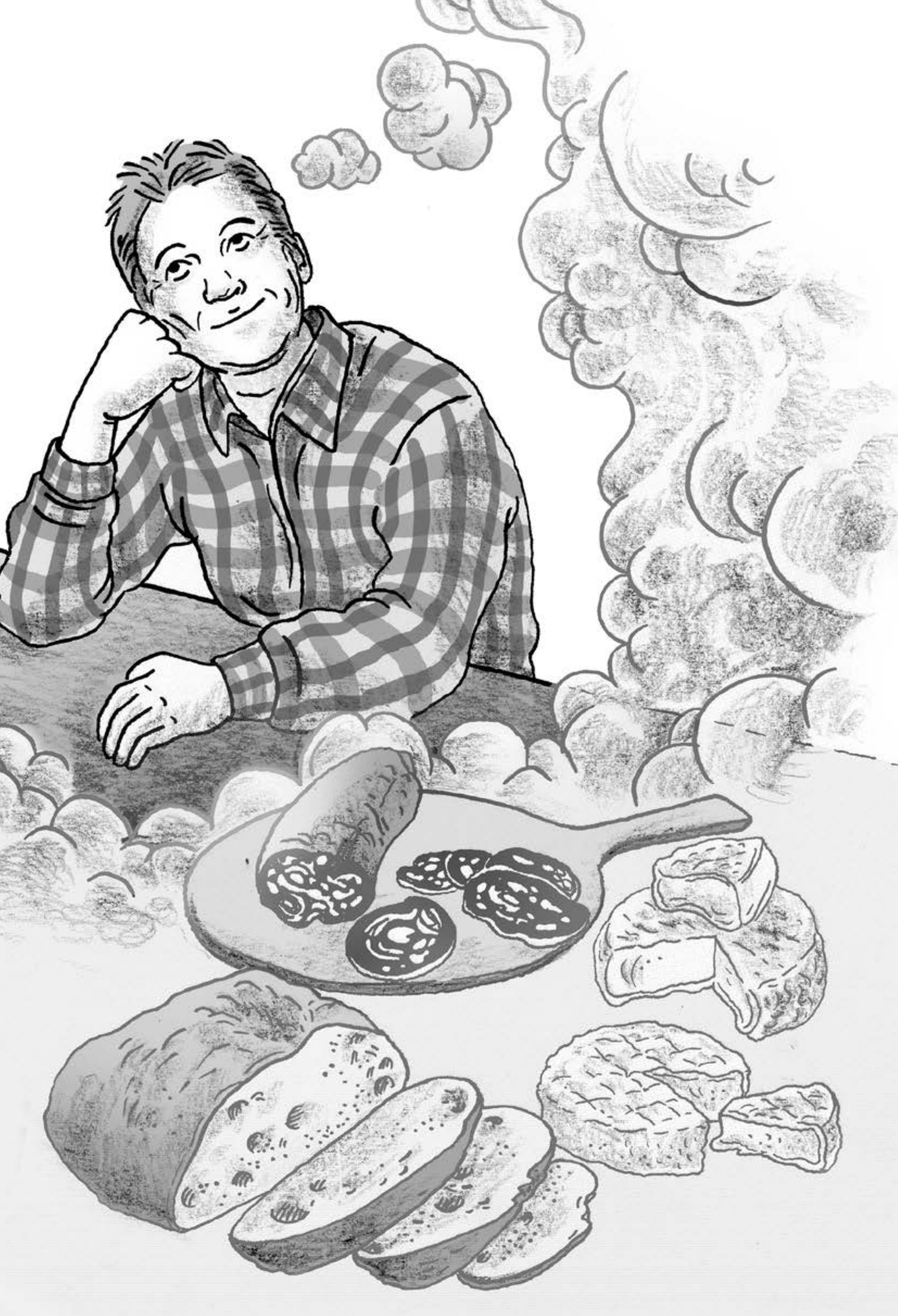
Les premiers antibiotiques étaient d'origine microbienne. En 1928, Sir Alexander Fleming remarqua que des moisissures (*Penicillium notatum*) produisaient une substance — baptisée « pénicilline » — qui détruisait les cultures de streptocoques. Lors de la Seconde Guerre mondiale, la production industrielle de la pénicilline commença et devint un effort de guerre en Amérique. L'amélioration du milieu de culture, le changement de technologie, de microorganisme producteur (*Penicillium crysogenum*), puis la transgenèse permirent de passer d'une production de 4 unités à 60 000 unités/ml de pénicilline en 200 heures. Les antibiotiques allaient révolutionner le traitement des maladies d'origine bactérienne.

Les phages ont une action très ciblée, ce qui est un désavantage (pour détruire plusieurs types bactériens, il faut plusieurs phages), mais surtout un avantage : seules les cellules cibles sont touchées. Détruire les bactéries pathogènes sans toucher au microbiote sain, c'est idéal ! Des chercheurs ont imaginé mettre à profit cette spécificité en gardant l'enveloppe des phages (la capside, où se retrouve la clé de reconnaissance des bactéries) et en lui faisant transporter un système de destruction des cellules bactériennes

cibles. Ces pseudo-phages modifiés sont appelés « éligobiotiques », du latin *eligere*, « choisir, trier ».

La spécificité des phages et autres virus pour leurs cellules cibles est mise à profit dans différents domaines de la santé. La cible peut ne pas être une cellule bactérienne mais une cellule humaine « malade ». En virothérapie oncolytique, un virus de l'herpès modifié est utilisé pour détruire les cellules cancéreuses de certains cancers de la peau, et des virus de rhumes et de la rougeole modifiés sont à l'étude pour soigner des cancers du pancréas, du foie, du cerveau et des poumons. En thérapie génique, on fait transporter à des virus (modifiés pour ne pas pouvoir se multiplier chez l'homme) des gènes-médicaments chargés de remplacer le gène défectueux responsable de la maladie. Une trentaine d'enfants-bulles mènent aujourd'hui une vie ordinaire grâce à la thérapie génique.

Valentin agite les bras, repousse et fait tomber son biberon d'eau et son doudou. Teste-t-il la « règle des cinq secondes » selon laquelle on considérait qu'un objet tombé à terre et ramassé dans les cinq secondes était indemne de transfert microbien ? On sait maintenant que la contamination est instantanée et qu'elle augmente avec le temps de contact. Non, Valentin n'expérimente pas cette règle, pas plus qu'il ne vérifie la loi de la gravité. Il s'amuse simplement avec la patience de Julie.



9
THOMAS, L'ONCLE ÉCOLOGISTE

Où l'on fait l'apologie de la fermentation sous toutes ses facettes. Où l'on célèbre les aliments fermentés, autant pour leurs saveurs que pour leurs effets positifs sur la santé ou leur mode de conservation naturel. Où l'on peut apprécier les pouvoirs dépolluants des microbes et la ressource d'énergie renouvelable qu'ils représentent.



Thomas est l'oncle de Louise et le père de Valentin. C'est un fervent défenseur de l'écologie… et du terroir. Depuis qu'il est père de famille, il a en tête la phrase de Saint-Exupéry : « Nous n'héritons pas de la terre de nos ancêtres, nous l'empruntons à nos enfants. »

À 10 heures, Thomas revient du marché. Il est allé acheter de « bons » fromages de fabrication artisanale. Avec la grossesse de sa femme, il n'en a pas mangé pendant presque neuf mois, alors il se rattrape. Et comme aucun n'apparaissait sur les listes de Valérie…

Microbes de toutes saveurs

Thomas adore les fromages : du reblochon de Savoie au petit chèvre fermier, en passant par la boulette d'Aven. Passer de « simple » lait au riche panel des fromages, c'est extraordinaire ! Les fermentations nous ravissent par la diversité d'aliments et de saveurs qu'elles apportent.

Les aliments fermentés reflètent un territoire et des traditions, en France et partout dans le monde. Au Congo, on mange du *poto-poto* (pâte de maïs fermentée), en Corée du *kimchi* (choux et piments fermentés), et au Japon des *nattō* (haricots de soja fermentés par *Bacillus subtilis*). Les produits des fermentations se boivent aussi : *kombucha* (thé fermenté mongol), *rejuvelac* (jus de céréales germées fermentées), *kvas* (boisson fermentée slave, à base de levure, de pain noir et de sucre). Sans oublier le vin et la bière. Plusieurs milliers d'aliments fermentés existent, représentant 5 à 40 % des aliments consommés, selon les pays.

Lorsque Thomas entre dans la cuisine, une odeur de café le titille agréablement. Pourtant, les fruits frais du café ont peu d'arômes. Ceux-ci se développent lors du séchage et de la maturation grâce aux fermentations réalisées par une microflore naturellement présente à la surface des fruits ; ils sont ensuite amplifiés par la torréfaction. Le café est donc fermenté, tout comme le thé. Nous consommons

Il était une fois le roquefort

J'ai toujours entendu dire que le roquefort était dû à un berger du village de Roquefort, un peu amoureux et un peu étourdi, qui avait oublié son caillé de brebis dans une grotte du Combalou. Il l'avait retrouvé quelque temps plus tard, entièrement recouvert de moisissures à la saveur particulière. Un exemple de sérendipité (découverte fortuite) ? Plus probablement, une légende. L'histoire apparaît au XXe siècle alors que le roquefort est mentionné dès 1070.
La moisissure *Penicillium roquefortii* est aujourd'hui chouchoutée pour élaborer celui que Diderot a nommé le « roi des fromages ». Ensemencée volontairement dans le caillé, elle a besoin d'oxygène. Qu'à cela ne tienne, on perce le fromage de quarante trous sur toute sa hauteur.
Et qu'on se rassure, les souches utilisées sont « Gras » (*Generally Recognized as Safe*) et ne produisent pas de mycotoxines.

ainsi quotidiennement des aliments dont la saveur (acidité, arômes) et l'aspect (texture) dépendent d'une fermentation.

Qu'y a-t-il de commun entre un yaourt, des olives, de la sauce soja et de la choucroute ? Tous ont subi une fermentation lactique. On l'oublierait presque dans le saucisson. Elle se fait moins discrète dans les pains au levain, auxquels elle donne un goût acide caractéristique. Pourquoi l'emmental a-t-il des trous, contrairement au beaufort ? Ce dernier est élaboré exclusivement en cave froide (vers 10 °C), alors que l'emmental passe dans un second temps en cave chaude (vers 20 °C). Cela permet le dégagement de CO_2 et l'ouverture des « yeux » par les bactéries propioniques, dont la température favorite de développement est 25 °C. Ce sont ces mêmes bactéries qui donnent leur saveur à certains fromages hollandais à pâte semicuite. Quant à la couleur orange et à l'odeur du maroilles et du munster, elles sont dues à la bactérie riche en caroténoïdes *Brevibacterium linens*, qui affine le fromage.

Thomas pose les fromages sur le haut du frigo et pousse un vinaigrier. Tout comme Valérie, je fais depuis des années mon vinaigre. Rien de plus simple. Il suffit d'alimenter la « mère » — un biofilm

de bactéries acétiques développé à l'interface air/liquide — avec des restes de vin. Elle les transforme par fermentation acétique.

Thomas aime aussi jouer au « maître fermenteur ». Il dompte la fermentation lactique pour faire des yaourts maison, et la fermentation alcoolique pour son pain. Eh oui, le pain subit une fermentation alcoolique. La levure *Saccharomyces cerevisiae* transforme les sucres fermentescibles en alcool et en CO_2. Ce dernier étire le réseau de gluten et fait lever la pâte. Quant à l'alcool, il s'évapore à la cuisson. Cette même fermentation alcoolique est utilisée pour la fabrication de vin ou de bière, mais l'alcool est alors gardé !

De nouveaux anciens « conservateurs »

Par solidarité avec Julie, Thomas s'est privé pendant un certain temps des fromages à pâte molle. Ceux-ci font partie des aliments à risque pour les femmes enceintes, du fait de la présence possible de *Listeria monocytogenes*. Mais, sauf cas spécifiques, les fromages — et, de façon générale, les aliments fermentés — ne sont pas à risque microbiologique élevé. La fermentation induit une diversification, et aussi une stabilisation : le fromage est bien moins périssable que le lait, et les pathogènes ont tendance à en être exclus. Autrefois, la fermentation servait d'ailleurs avant tout à conserver. Elle reste aujourd'hui un procédé plus accessible que d'autres (mise en conserve, réfrigération), plus techniques. Elle revient à la mode chez nous et se propage *via* Internet, où l'on trouve de nombreuses recettes de lactofermentation (fermentation lactique) pour conserver nos légumes « à l'ancienne ».

Dans les fromages se produisent des interactions similaires à celles que nous avons vues dans les chapitres 1 et 8 avec les microbiotes cutanés et intestinaux. Grâce aux ferments, les fromages sont moins sensibles à la contamination par des pathogènes. C'est le principe de l'écologie microbienne dirigée. Les ferments consomment les

nutriments, d'autant plus qu'on les ensemence en forte concentration et qu'on sélectionne des conditions environnementales (température, source de carbone, oxygénation) qui leur sont favorables. Les pathogènes, privés de substrats, sont limités dans leur développement. Les ferments produisent aussi des composés inhibiteurs, voire létaux, pour des pathogènes, comme les acides organiques faibles produits lors des fermentations lactique, acétique et propionique, l'éthanol de la fermentation alcoolique ou les bactériocines des bactéries lactiques.

Le yaourt nécessite-t-il une date limite de consommation (DLC) ?

Que découvre-t-on sur l'étiquette d'un « yaourt » ? Tout d'abord, que certains sont des laits fermentés. En France, les yaourts sont obtenus par « le développement des seules bactéries lactiques thermophiles spécifiques, dites *Lactobacillus bulgaricus* et *Streptococcus thermophilus*, qui doivent être ensemencées simultanément et se trouver vivantes dans le produit fini, à raison d'au moins 10 millions de bactéries par gramme » (décret n° 88-1203). On trouve aussi, sur l'étiquette, une date limite de consommation (voir chapitre 4).

Une DLC ? Pourtant, le yaourt est un produit microbiologiquement sûr. Pour sa fabrication, le lait est pasteurisé*, refroidi à 42 °C, et ensemencé* avec les bactéries. Les ferments consomment* le lactose et acidifient* le produit jusqu'à un pH d'environ 4,3. La fermentation est stoppée par réfrigération. La mise en pots scellés* s'effectue avant (yaourts fermes) ou après (yaourts brassés) la fermentation. Enfin, le yaourt est stocké à 8 °C* avec une DLC*. Chaque * souligne un point de maîtrise des microbes. Ils sont multiples, et l'on peut se demander si une DLC se justifie.

En 2017, le journal *60 millions de consommateurs* a testé des yaourts périmés de 20 jours. Ils étaient tous conformes aux spécifications du décret. Il ne faut pas en conclure que toute DLC peut être dépassée. Ce qui est vrai pour les yaourts ne l'est pas pour des produits plus sensibles : les mousses au chocolat, les crèmes, les viandes, les poissons, etc. Les yaourts sont des cas à part, qui peuvent créer une confusion dans l'esprit des consommateurs. L'Espagne serait d'ailleurs prête à leur attribuer une date de durabilité minimale (DDM) au lieu d'une DLC.

La plus étudiée des bactériocines est la nisine. Naturellement produite lors de fermentations par *Lactococcus lactis*, elle est aussi autorisée en France comme additif alimentaire dans certains fromages, produits fromagers et crèmes. Elle est alors élaborée en dehors de l'aliment, puis ajoutée, souvent pour lutter contre *Listeria monocytogenes*. Sa présence dans un aliment est signalée par un E 234 sur l'étiquette.

La protection « par des microbes contre des microbes » est si efficace qu'aujourd'hui des souches sont sélectionnées pour « biopréserver » des aliments frais (non fermentés) tels que des crevettes ou du jambon cru, ce qui limite le recours aux conservateurs chimiques. Ces souches sont inoffensives : les ferments traditionnels ont le statut « Gras » et les « nouvelles » flores sont évaluées par l'Autorité européenne de sécurité des aliments (AESA).

La biopréservation diversifie les utilisations des flores lactiques par les industriels de l'agroalimentaire. Déclenchera-t-elle aussi un engouement pour les bactériophages (voir chapitre 8) ? Ces virus bactériens (qui sont à l'étude comme alternative aux antibiotiques en santé humaine) peuvent être utilisés volontairement en thérapie phagique pour réduire la contamination du bétail, en décontamination des surfaces des produits alimentaires (fruits, viande) ou des surfaces inertes, et en « conservateurs » pour augmenter la durée de vie des aliments, avec des autorisations variables selon les pays. Très spécifiques, ils ne sont pas capables d'infecter l'homme et ne se propagent pas dans l'environnement. Des vertus qui enchantent Thomas l'écologiste !

Des microbes bons pour notre santé ?

L'odeur du café a éveillé l'appétit de Thomas. Il dégusterait bien un en-cas avec quelques produits fermentés : pain, fromage… Il se raisonne. Il n'est que 10 heures, et demain promet d'être pantagruélique !

Les aliments fermentés constituent un apport calorique, comme tout aliment, mais ils sont bien plus que cela. Ils apportent des minéraux, des vitamines, des acides aminés essentiels, libérés par fermentation. Par exemple, les yaourts contiennent les mêmes vitamines que le lait, mais en quantité plus importante du fait de l'ajout de lait en poudre et de la fermentation lactique. Il y a ainsi 25 µg de vitamine B9 dans 100 g de yaourt, pour seulement 2,7 µg dans 100 g de lait demi-écrémé UHT.

Les probiotiques, n'est-ce pas automatique ?

Les probiotiques sont des microbes qui, ingérés vivants en quantité suffisante, exercent des effets positifs sur la santé, autres que nutritionnels. Autrefois, avec les aliments fermentés, on consommait sans le savoir des probiotiques dans l'alimentation courante. Je revois aussi ma grand-mère saupoudrant la salade de levure de bière. Le médecin nous prescrivait parfois de l'ultra-levure lors de la prise d'antibiotiques pour renforcer notre flore intestinale. Il le fait toujours et, aujourd'hui, les probiotiques se consomment de plus en plus en gélules, mises en évidence dans les parapharmacies. Pour quels effets réels ?

Ce n'est pas parce que l'on parle de probiotiques qu'il faut « avaler » n'importe quoi. Ce ne sont pas des produits miracles ; leur efficacité dépend de nombreux facteurs, dont les souches, leur mode de préparation, et la physiologie de celui qui les absorbe. Vous ne verrez d'ailleurs pas d'allégation santé sur les aliments qui contiennent des probiotiques. Par exemple, une certaine boisson lactée fermentée n'a pas eu le même succès que le *yakult* japonais dont elle s'inspirait. Une communication trop précoce sur des effets bénéfiques, insuffisamment prouvés scientifiquement, s'est vue stoppée par l'AESA. Depuis, les études continuent.

Les fermentations détruisent aussi des composés néfastes contenus dans les matières premières. Si le manioc a pu devenir le principal aliment de nombreux pays d'Afrique et d'Asie, c'est grâce au rouissage, une fermentation lactique qui élimine le cyanure, très toxique, contenu dans la plante et ses racines. En Europe, nous consommons plus de céréales complètes que de manioc. Celles-ci

contiennent des composés, les phytates, qui sont dits « antinutritionnels », car ils piègent les minéraux et nous empêchent de les assimiler. Ces phytates sont détruits par des enzymes bactériennes activées lors des fermentations.

Manger des produits fermentés est sain. Manger des microbes peut aussi l'être : l'ingestion de microbes probiotiques peut être bon pour nous, de notre peau jusqu'à notre cerveau, en passant par notre intestin. Les probiotiques permettraient aussi de limiter la prise de poids, le développement de diabète de type 2 (celui qui touche plutôt les adultes en surpoids) et réduiraient certains risques cardiovasculaires.

Microbes dévoreurs de pollution

L'odeur du café est agréable à Thomas, contrairement à la vision de la machine à capsules qui le produit. Que deviennent les capsules utilisées ? Sont-elles recyclées ? Thomas se pose souvent ce genre de question. Une des dernières qui l'a taraudé concernait les couches-culottes de son fils. À raison d'une moyenne de 5 500 par enfant, que de déchets ! Peut-il les composter ? Malheureusement non. Elles contiennent du polyacrylate de sodium, non biodégradable. Thomas a bien essayé de convaincre Julie d'utiliser des couches lavables. Sans succès pour le moment.

Les microbes ne réalisent pas uniquement des fermentations alimentaires. Loin de là. Ils sont aussi des agents de synthèse de produits non alimentaires (antibiotiques, arômes, enzymes, acides aminés, bioplastiques, etc.) et de réduction de nos résidus et pollutions. En France, le compostage se développe pour traiter les déchets verts et les fractions fermentescibles des ordures ménagères (épluchures, restes alimentaires), tant après collecte que chez les particuliers. Du fumier, du lisier, des déchets organiques industriels végétaux et animaux sont aussi compostés. Les microbes dégradent

alors la matière organique en présence d'oxygène, entraînant un dégagement de chaleur qui détruit les pathogènes. Le volume des déchets est ainsi réduit et transformé en amendement valorisable. Avant d'acheter un compost, il est bon de vérifier qu'il est conforme à la norme NF U 44-051 qui fixe les teneurs limites en microbes, métaux et impuretés. Si vous produisez le vôtre, veillez à diversifier les intrants (déchets de tonte, branchages, restes alimentaires) et à l'aérer. Des lombrics s'installent ? C'est gagné ! Votre compost est mature.

Thomas rejoint Antoine sur la terrasse. Il entend Louise chanter à tue-tête dans la salle de bains, et espère qu'elle coupe l'eau de temps en temps. Car cette ressource est précieuse et on doit l'économiser. Il est aussi de notre responsabilité de la polluer au minimum (en ne jetant pas n'importe quoi dans les égouts, en respectant la séparation des eaux pluviales et usées, en s'interdisant des vidanges sauvages, etc.), même si les microbes sont champions pour éliminer les polluants de nos eaux usées.

L'été 2017, en vacances en Bourgogne, je suis remontée à l'une des sources de la Seine. En voyant le filet d'eau, j'ai eu du mal à imaginer le fleuve qui fournit en eau potable tant de Français et dans lequel se jettent de nombreuses eaux usées épurées. Les systèmes épuratoires s'adaptent à la situation géographique et démographique. Nombre d'entre eux se basent sur des procédés microbiens : de la lagune à la station d'épuration à boues activées, en passant par la fosse septique. Par exemple, la station d'épuration Seine amont, à Valenton, en région parisienne, est remarquable : les pollutions carbonées, azotées et phosphorées y sont transformées par voie biologique. Même le résidu majoritaire de cette dépollution, les boues, est digéré par des microbes ! Seul bémol à ce « tout bio », les odeurs sont éliminées par voie chimique, alors que d'autres stations utilisent des biofiltres où les odeurs sont piégées puis dégradées par des microbes.

Les microbes peuvent traiter les polluants atmosphériques, que ce soient des odeurs issues de dégradation de la matière organique ou

Microbes de l'extrême

Les microbes peuplent les endroits les plus improbables de la planète, où ils sont souvent les premiers maillons des chaînes alimentaires : lacs salés, acides ou basiques, sommets montagneux, plaines glacées de l'Antarctique, dorsales océaniques, etc.
Pyrolobus fumarii a été trouvé à 3 650 m de profondeur en Atlantique, dans le noir, la chaleur et l'acidité. Sa température favorite de croissance ? 106 °C ! L'eau n'est alors liquide que parce qu'elle est sous pression.
Ramlibacter tataouinensis se sert comme substrat de la météorite de Tataouine, tombée en 1932 dans le désert sud-tunisien. La bactérie s'adapte à la chaleur et la sécheresse. Elle s'enkyste le jour et se réveille à la tombée de la nuit, pour se multiplier avec la rosée.
Certains extrêmophiles ont été « apprivoisés » pour diverses utilisations. *Acidithiobacillus thiooxidans* aime particulièrement les milieux acides. On le trouve naturellement dans les mines acides de cuivre, où son développement est optimisé afin d'extraire le métal des gisements à faible teneur. Sa capacité à oxyder l'H_2S en acide sulfurique est aussi utilisée pour dépolluer des effluents gazeux.
Deinococcus radiodurans et *Kineococcus radiotolerans* résistent à des radiations létales pour la plupart des organismes vivants. Leur secret : une incroyable capacité de réparation de l'ADN. Provenant d'une cuve de déchets radioactifs, *Kineococcus radiotolerans* a également montré une tolérance et des capacités de dégradation d'herbicides et de solvants chlorés particulièrement peu biodégradables. Un futur dépollueur en milieu radioactif ?

des polluants gazeux résultant de combustions, comme le CO_2. Lutter contre ce gaz à effet de serre, c'est réduire préventivement son émission et favoriser sa réabsorption par les organismes photosynthétiques. Pas évident d'implanter une forêt en ville. Alors d'autres solutions sont testées. Ainsi, une colonne particulière a été installée, au printemps 2017, sur une place à Paris. Remplie de microalgues, elle capterait autant de CO_2 que 100 arbres. Mettre en place de nouveaux puits de carbone : un projet qui plaît à Thomas.

Les microbes dépollueurs font aussi des merveilles dans les sols. Nous connaissons tous le Stade de France. Mais savez-vous qu'il est

installé sur le sol bioréhabilité d'un ancien site gazier ? J'ai visité ce site alors que j'étudiais la biodégradation des hydrocarbures aromatiques polycycliques, des polluants présents notamment dans les sols des sites gaziers. C'était une friche industrielle où, dans un tas de terre excavée (un biotertre), des microbes dégradaient des polluants pourtant récalcitrants. Thomas y a, lui, assisté à un match de rugby France-Angleterre ! Belle évolution.

Une manne pour l'énergie

Alors qu'il lève les yeux vers la fenêtre de la salle de bains, Thomas s'aperçoit que la lumière de la terrasse brille. Un gaspillage facilement évitable. Fervent partisan de la lutte anti-gaspi, Thomas rêve aussi d'énergie renouvelable. Quand Valentin sera un adolescent, peut-être l'électricité ne sera-t-elle plus produite par le nucléaire ou l'hydraulique. Peut-être sera-t-elle majoritairement solaire. Et pourquoi pas biologique ?

Certains partagent ce rêve. Une start-up française a développé une ampoule biologique, en incorporant des bactéries bioluminescentes dans des résines organiques transparentes, pour un éclairage pendant 24 heures. Un peu court et sans interrupteur, mais magique. Des chercheurs étudient des biofilms de *Geobacter sulfurreducens* et de *Rhodoferax ferrireducens*, capables d'alimenter un circuit électrique. Nous sommes au début d'un grand chantier énergétique où les microbes sont les ouvriers.

Ce chantier a déjà commencé avec le biogaz. Ce mélange de méthane (environ 60 %) et de CO_2 (40 %) résulte de la succession de fermentations sans oxygène (méthanisation) de résidus organiques (déchets agricoles, ordures ménagères, boues de stations d'épuration, etc.). Les conditions tarifaires de rachat de l'énergie sont un levier pour la valorisation de cette énergie. Tout comme le développement de nouveaux moyens pour la stocker et la

transporter. À la station d'épuration Seine amont, le biogaz produit lors de la digestion des boues est déjà valorisé sur place en électricité et en chaleur, et sa production excède les besoins énergétiques de la station. L'excédent est pour le moment brûlé en torchère. Liquéfié et cryogénisé, le biométhane de Seine amont pourrait faire rouler deux camions chaque jour, avec un bilan carbone inférieur de 80 % par rapport aux carburants classiques.

Élaborer des biocarburants, c'est diminuer notre besoin en carbone fossile. Les 10 % de bioéthanol de l'essence SP95-E10 sont fabriqués par fermentation-distillation. Problème : la production énergétique concurrence ici la production alimentaire, car le substrat des fermentations est surtout constitué, actuellement, de plantes habituellement cultivées à des fins alimentaires (blé par exemple). Des biocarburants de seconde génération sont donc à l'étude, utilisant des résidus agricoles, des déchets forestiers et des plantes non comestibles, en attendant la troisième génération, basée sur des algues. Les microbes sont décidément de fabuleux alliés du développement durable !

L'avenir de Valentin sera-t-il dans les biotechnologies à vocation environnementale ? Thomas en rêve. En attendant, il va proposer son aide à Eugénie… et picorer quelques olives.





10
PIERRE, LE GRAND-PÈRE PHILOSOPHE

Où l'on comprend que les hommes sont des êtres mosaïques et l'on se pose de drôles de questions, en lien avec l'origine de la vie sur Terre, l'évolution et… l'éternité. Où l'on s'interroge sur la notion de « mauvais microbe » et l'on se demande s'il est possible d'« apprivoiser » les microbes ou, au contraire, de vivre sans eux.

Pierre est le grand-père maternel de Louise et le mari d'Eugénie. Cet ancien professeur de grec est aussi contemplatif que sa femme est active. Sa petite-fille Flore doit tenir… de chacun d'eux. Depuis qu'il a cessé d'enseigner, il s'adonne souvent à la lecture d'essais philosophiques.

À 10 heures, Pierre lit un journal grand public, et y découvre un titre choc : « Elle s'injecte une bactérie millénaire pour rester jeune ». Le titre est suivi d'un texte non moins accrocheur : « Une actrice allemande cherche tous les moyens pour ne pas vieillir. […] Elle s'injecte un produit à base de bactéries vieilles de 3,5 millions d'années. » Que penser de cela ?

Les bactéries sont-elles éternelles ?

Pierre connaît le mythe grec de l'éternelle jeunesse : Hébé, la fille de Zeus et d'Héra, servait aux dieux l'ambroisie, boisson de la jeunesse éternelle. Les bactéries auraient-elles découvert ce breuvage magique ? On peut se poser la question car, si une bactérie peut mourir, tuée par la chaleur ou un désinfectant, elle semble aussi pouvoir vivre éternellement en se multipliant dans un milieu renouvelé qui rapporte des nutriments et élimine les toxiques. Cela nous permet, entre autres, de fabriquer des yaourts « maison » en ensemençant du lait avec un peu de yaourt, de faire du vinaigre pendant des années à partir de la même « mère », de conserver la même base microbienne pour de multiples boissons lactofermentées.

Quel âge ont des bactéries en train de se multiplier ? D'ailleurs, peut-on le déterminer ? Les bactéries se divisent en deux par le milieu, et chaque bactérie fille possède une nouvelle partie, apparue lors de la scission, et une ancienne, venant de la cellule mère. Dans une culture « idéale » où toutes les bactéries se divisent, juste avant la énième division n, chaque bactérie a un pôle âgé de t (t est le temps, constant, entre deux divisions ; il est d'environ

20 min chez *Escherichia coli* dans des conditions optimales de croissance) ; l'âge du deuxième pôle est de 2 × *t* ou 3 × *t* ou 4 × *t*… ou *n* × *t*, selon les bactéries. Des chercheurs ont montré que les bactéries ayant les pôles les plus anciens mouraient plus facilement… comme si elles avaient vieilli. L'éternelle jeunesse ne serait donc pas pour elles non plus.

Les microbes sont quand même capables de se mettre dans des états qui leur permettent de résister au temps et de « reprendre vie » lorsque les conditions s'améliorent. Ainsi, les spores bactériennes sont des formes de résistance aptes à traverser les siècles enfouies dans le sol, puis à redonner des bactéries vivantes. Des virus de plus de 30 000 ans ont été isolés de sols gelés sibériens et « ressuscités ». Preuve que la congélation les conserve.

Presque éternelles, les bactéries peuvent-elles nous aider dans la lutte antivieillissement ? En juillet 2017, des chercheurs montraient que l'indole, une molécule produite par des bactéries intestinales,

Les spores, des formes d'éternité bactérienne ?

Les spores apparaissent notamment dans les bactéries des genres *Clostridium* et *Bacillus* lorsque les conditions environnementales sont défavorables. Déshydratées, extrêmement résistantes, les spores restent en dormance, puis germent lorsque l'environnement devient clément.

Elles assurent ainsi la survie et la dissémination de l'espèce. À travers l'espace : elles résisteraient à un aller-retour Terre-Lune sur la carlingue d'une fusée. À travers le temps : certaines ont été revivifiées à partir de momies égyptiennes embaumées depuis trois mille ans.

Les spores de *Bacillus anthracis* étaient à l'origine des « champs maudits » dans lesquels mouraient, année après année, les animaux qui s'y trouvaient. Les sols de ces champs avaient été contaminés par des cadavres d'animaux morts de la maladie du charbon, parfois plusieurs centaines d'années plus tôt. Dans de nombreux sols, survivent aussi des spores de *Clostridium tetani*, agent responsable du tétanos contre lequel nous sommes vaccinés.

permet à des vers, des mouches et des souris de vivre à un âge avancé dans des conditions de santé améliorées. L'effet serait-il le même chez l'homme ? Notre microbiote intestinal serait-il notre meilleure « pilule anti-âge » ?

Déjà utilisé depuis plusieurs dizaines d'années, ce que nous connaissons sous le nom de « botox » contient des toxines de *Clostridium botulinum*. Les toxines botuliques, lorsqu'elles sont préformées dans un aliment et ingérées, sont responsables de paralysies qui peuvent entraîner la mort. Mais elles bénéficient d'une autorisation de mise sur le marché (AMM) pour soigner des maladies oculaires et… effacer les rides entre les sourcils. L'effet des toxines, dû à leurs propriétés de relâchement musculaire qui gomment les rides d'expression, est temporaire. Une « jeunesse » à entretenir tous les six mois… Et je ne parlerai pas de la bactérie qui fait fantasmer l'actrice allemande. Ce *Bacillus*, isolé du *permafrost* en 2009 par un chercheur russe, aurait des propriétés de jouvence qu'aucun article scientifique ne corrobore.

Pierre est perplexe : la recherche d'une utopique éternelle jeunesse conduit à bien des extrémités !

Sommes-nous des chimères ?

Quelles que soient ses lectures, Pierre en revient toujours à la mythologie grecque. En songeant à l'injection bactérienne de l'actrice, le mot « chimère » lui vient à l'esprit : « Elle avait la partie avant d'un lion, la queue d'un dragon, et son troisième chef, celui du milieu, de chèvre. »

Ne sommes-nous pas, nous aussi, constitués de plusieurs êtres ? Nos microbes font plus du poids de notre cerveau, et notre corps héberge de 1 à 10 fois plus de cellules microbiennes que de cellules humaines. Nos quelque 23 000 gènes humains sont à comparer aux 2 millions à 20 millions de gènes de nos microbiotes…

Ne contenons-nous pas de l'ADN « chimérique », formé par recombinaison de fragments de plusieurs origines ? Les projets de séquençage *Microbiome Human Project* aux États-Unis et *MetaHIT* (pour *Metagenomics of the Human Intestinal Tract*) en Europe, débutés en 2008, ont fait progresser la connaissance sur nos microbiomes (ensemble des génomes microbiens que nous hébergeons). On savait que du matériel génétique de virus s'était introduit, il y a des millions d'années, dans le génome de cellules reproductrices des vertébrés, et qu'il s'était transmis d'une génération à l'autre. On évalue aujourd'hui à 8 % le génome humain venant de virus. Si la plupart de ces séquences génétiques sont non fonctionnelles, certaines codent des protéines. Les insertions virales seraient notamment impliquées dans la formation du placenta et dans la tolérance immunitaire du fœtus par la mère. Nombre de ces virus endogènes font partie d'une famille de virus connus pour être à l'origine de cancers. Alors, y a-t-il danger ?

Les virus qui sont intégrés depuis longtemps dans un hôte ont évolué avec lui et n'induisent que peu de pathologies. L'hypothèse est même émise que les virus pathogènes — comme celui de l'hépatite B — seraient « nouveaux » (sur l'échelle du temps de l'évolution) et qu'ils se répliqueraient et muteraient du fait d'une adaptation imparfaite à leurs hôtes. Maintenir un microbe dans un hôte serait-il ainsi un moyen de le « domestiquer » et de réduire sa pathogénie ?

Cette hypothèse a été émise par Paul Ewald, spécialiste de l'évolution des maladies infectieuses. Il s'est notamment basé sur l'étude d'une épidémie latino-américaine de choléra qui a duré de 1991 à 2005, touchant plus d'un million de personnes et en tuant 10 000. Une dizaine d'années après le début de l'épidémie, les souches de *Vibrio cholerae* retrouvées au Chili avaient évolué vers une pathogénie moindre, contrairement à celles observées au Pérou et en Équateur. Dans ces deux pays, l'eau était un vecteur important de transmission des bactéries, et le contact interhumain n'était pas nécessaire,

contrairement à ce qui se passait au Chili. Ainsi, l'adage qui conseille de garder ses amis près de soi et ses ennemis encore plus près serait aussi à appliquer pour les microbes !

Alors oui, nous sommes des chimères, des êtres mosaïques structurés par de multiples interactions entre nos propres cellules et celles de nos microbiotes, entre notre génome et ceux de nos virus endogènes. « Ils sont nous. Nous sommes eux », clame Jonathan Eisen, spécialiste de l'évolution microbiologique et génomique. Cependant, de nombreuses fonctions de nos microbiotes sont encore à étudier et, même si leurs potentialités sont enthousiasmantes, il faut se méfier des effets d'annonce et se focaliser sur les résultats scientifiquement prouvés.

Pathogène à tuer ou bénéfique à choyer : est-ce facile de conclure ?

Déterminer le « statut » commensal, symbiotique ou pathogène d'un microbe n'est pas si évident. Tout est une question d'hôte, d'environnement, de contexte, et il est parfois impossible de trancher. Un microbe peut être tout autant Dr Jekyll que Mr Hyde, et choisir de l'éradiquer, ou de le favoriser, peut déséquilibrer de façon inattendue l'écosystème où il évolue.

Les mêmes bactéries peuvent nous être bénéfiques lorsqu'elles sont dans notre intestin et entraîner une septicémie si ce dernier se rompt lors d'une péritonite. La présence d'*Helicobacter pilori* dans l'estomac a été identifiée comme un facteur de risque pour le développement d'ulcères et de cancers de l'estomac. Selon les chercheurs, son activité antiacide augmente ou diminue le risque d'apparition de reflux gastro-œsophagien et de cancer de l'œsophage.

Dans un autre domaine, la moisissure *Botrytis cinerea* est responsable de pourriture grise peu appréciée sur le raisin… sauf pour certaines vendanges tardives donnant des vins liquoreux. C'est alors une pourriture noble, qui assèche les grains et permet le développement d'arômes par concentration naturelle. Quant à la levure *Saccharomyces cerevisiae*, elle altère les jus de fruits et élabore les vins par la même fermentation alcoolique.

Les microbes, source de vie sur Terre

Pierre sort rejoindre son beau-fils Antoine sur la terrasse. Il voit Flore qui, le nez en l'air, contemple les nuages. Il entend Youpi qui jappe en coursant un chat de passage. Un rouge-gorge sautille non loin de Jean-Michel, à l'affût d'insectes qui ont été délogés par le bêchage. Parfois, lorsqu'il se laisse aller à des pensées philosophiques, Pierre s'interroge sur l'origine et le but de la vie sur Terre. D'après ce qu'il a lu, les microbes en sont l'*alpha*. En seront-ils l'*oméga* ?

Malgré des indices qui semblent de plus en plus anciens — en 2015, du carbone provenant très probablement d'organismes vivants a été trouvé dans des minéraux datant d'il y a 4,1 milliards d'années —, la façon dont la vie est apparue sur Terre demeure un mystère. Les premiers êtres vivants ont-ils bien été des cellules de type procaryote (mot venant du grec qui signifie littéralement « avant noyau ») ? Ils seraient apparus dans une « soupe » et une atmosphère primitives contenant de l'azote, de l'hydrogène, du dioxyde de carbone et de la matière organique, qu'ils auraient modifiée tout en évoluant. Actuellement, les procaryotes ont d'ailleurs toujours une fonction primordiale dans la transformation des composés minéraux et organiques. Ils participent ainsi aux chaînes alimentaires et aux cycles biogéochimiques.

Plus tardivement, la cellule eucaryote (littéralement « noyau vrai ») aurait découlé de la symbiose de deux types de cellules procaryotes : une archée aurait internalisé une bactérie, laquelle serait devenue une mitochondrie (organite intracellulaire qui fournit de l'énergie aux cellules eucaryotes). On a ainsi obtenu les « ancêtres » très lointains des cellules animales. Certaines de ces cellules ancestrales auraient intégré des cyanobactéries qui auraient évolué en chloroplastes, dotant ces nouvelles cellules (les « ancêtres » des cellules végétales) de la possibilité de photosynthèse.

D'où vient le noyau qui donne son nom à la cellule eucaryote ? La membrane cellulaire s'est peut-être invaginée pour entourer le matériel génétique, ou bien ce pourrait être un virus qui aurait infecté une cellule primitive. Nos gènes gardent encore la trace de cette évolution : 37 % descendent d'un gène ancestral commun avec ceux des procaryotes (bactéries et archées), et 28 % avec ceux des eucaryotes unicellulaires.

Et si demain les microbes disparaissaient ? Il n'y aurait plus de maladies infectieuses dues à des toxines microbiennes. Aucune tomate moisie et aucun jambon rendu verdâtre par *Pseudomonas fluorescens*. Fini les canalisations bouchées par des biofilms malodorants et la biodétérioration des bâtiments… mais fini également le pain, le fromage et le vin, la biodégradation des polluants et l'autoépuration des cours d'eau.

Les végétaux morts et les cadavres ne se décomposeraient plus que « laborieusement ». Il faudrait probablement développer une dégradation chimique ou les brûler, ce qui libérerait du CO_2. Ce serait ennuyeux pour l'effet de serre, d'autant que l'absorption du gaz par les puits de carbone serait moindre, du fait de la disparition des bactéries autotrophes (qui assimilent le CO_2) et de la diminution des végétaux photosynthétiques.

Ces derniers péricliteraient, car il n'y aurait plus de mycorhizes ni de bactéries rhizosphériques pour les stimuler. Et il n'y aurait plus de fixation du diazote, qui fournit aux plantes les formes azotées assimilables. S'il n'y avait plus de symbiose des légumineuses avec les bactéries *Rhizobium* ou *Agrobacterium*, fèves et graines de soja, flageolets, haricots blancs, rouges, verts, mungo, lentilles de toutes les couleurs, pois cassés, chiches et secs seraient atrophiés. À moins que l'homme compense le manque d'azote biodisponible en utilisant davantage d'engrais…

Qui dit disparition des microbes et réduction de la flore dit aussi diminution de la photosynthèse et de la formation d'oxygène. Sans

parler de la perte des fonctions portées par nos microbiotes. Nous serions comme des souris axéniques, anxieuses, désorientées et chétives…Selon Philippe Sansonetti, médecin, microbiologiste et professeur, le scénario optimiste d'un monde sans microbes verrait la survie de seulement quelques espèces vivant dans des écosystèmes particuliers. Il y a fort à parier que nous n'en ferions pas partie… Heureusement, les microbes de notre quotidien — tout comme ceux plus éloignés — sont toujours là !

« Quel que soit le critère auquel on se réfère, les bactéries furent dès le début, sont aujourd'hui, et resteront toujours les organismes les plus réussis de la Terre », écrivait le paléontologue spécialiste de l'évolution Stephen Jay Gould dans *L'Éventail du vivant*.

Pour Pierre, les êtres les plus réussis de la Terre, ce sont ses petits-enfants. D'ailleurs, il entend Louise qui chante « Demain, je serai la plus belle… ». Demain, la fête sera aussi fort belle.

Pour en savoir plus sur les microbes

Sur les symbioses : Selosse Marc-André, 2017. *Jamais seul. Ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations*. Éditions Actes Sud.

Sur les biofilms : Briandet Romain, Fechner Lise, Naïtali Murielle, Dreanno Catherine, 2012. *Biofilms, quand les microbes s'organisent*. Éditions Quæ.

Sur les microbiotes : Knight Rob, 2016. *Les grands pouvoirs des bactéries*. Marabout.

Sur les virus : Langevin Christelle, Biacchesi Stéphane, Brémont Michel, Le Goffic Ronan, Galloux Marie, Chevalier Christophe, 2017. *Les virus. Ennemis ou alliés ?* Éditions Quæ.

Sur les microbes pathogènes et leur maîtrise : Naïtali Murielle, Guillier Laurent, Dubois-Brissonnet Florence (coord.), 2017. *Risques microbiologiques alimentaires*. Éditions Lavoisier, collection Tec et Doc.

Sur la vie sans microbes : Sansonetti Philippe, 2016. *Un monde sans microbe : rêve ou cauchemar ?* http://www.college-de-france.fr/site/philippe-sansonetti/course-2016-01-20-16h00.htm (consulté le 8 janvier 2018).

Des podcasts pour voir la science et la microbiologie autrement : TED Talks, https://www.ted.com/topics/microbiology (consulté le 15 décembre 2017).

Deux anecdotes scientifiques par semaine : Scientips, http://artips.fr/Sciencetips/ (consulté le 15 décembre 2017).

Remerciements

Mille mercis à Romain Briandet, responsable de l'équipe Bioadhésion, biofilm et hygiène des matériaux de l'Inra. Nous aurions pu écrire ce livre ensemble. Ses idées se mêlent aux miennes pour en constituer le point de départ scientifique.

J'aime la microbiologie environnementale. Je le dois à Jean-Paul Vandecasteele, mon directeur de thèse à l'Institut français du pétrole, il y a maintenant… quelques années. Un jour, j'ai bifurqué vers la maîtrise des bactéries pathogènes. Je remercie Florence Dubois-Brissonnet, professeur en microbiologie et sécurité sanitaire des aliments à AgroParisTech de m'avoir accompagnée sur cette voie.

Je remercie Sylvie Blanchard, éditrice chez Quæ, pour ses relectures attentives, ses conseils, ses questionnements et ses réponses aux miens. J'avais aimé les dessins de Charlotte Arène dans *Étonnants envahisseurs*. J'étais impatiente de découvrir ceux de ce livre. Je n'ai pas été déçue !

Ce livre est l'histoire d'une famille. Toute ressemblance avec des personnes existantes n'est pas que fortuite. Les réflexions et les gestes de ceux qui m'entourent m'ont inspiré quelques situations. Alors, un grand merci plus particulièrement à mes deux filles et à mon fils.

Déjà paru dans la même collection :

Étonnants envahisseurs - Ces espèces venues d'ailleurs
Vincent Albouy, 2017

Responsable éditoriale : Véronique Véto
Responsable de collection : Sylvie Blanchard
En couverture : dessin d'Héloïse Chochois
Dessins des pages intérieures : Charlotte Arène
Maquette et mise en page : Gwendolin Butter

Imprimé par CPI en mars 2018
Dépôt légal : avril 2018

Sans en avoir toujours conscience, nous cohabitons constamment avec des microbes, qu'ils se trouvent sur ou dans notre corps ou qu'ils soient présents dans les environnements que nous fréquentons.
Certains d'entre eux nous sont depuis longtemps indispensables. Il est connu que le pain, le vin ou encore le café nécessitent une fermentation réalisée par des microbes. Mais savez-vous qu'utiliser certains microbes permet de réduire le recours aux conservateurs chimiques dans les aliments ? Que l'usage de virus propose une alternative aux antibiotiques ? Que la police scientifique de demain résoudra peut-être des crimes grâce à nos microbiotes ?
Ou encore que certaines bactéries nous mettent d'humeur joyeuse ? Que les microbes peuvent favoriser nos cultures car ils interagissent naturellement dans le sol avec toutes les plantes ? Certes, ils peuvent causer des infections, et des précautions d'hygiène restent nécessaires. Mais vous découvrirez aussi que certaines organisations microbiennes en biofilms nous protègent contre des microbes pathogènes.
Dans ce livre, dix personnages d'une famille, selon leur âge et leurs activités, nous présentent les actions, bénéfices et opportunités des bactéries, virus, levures, champignons et autres microorganismes.

Spécialiste en microbiologie de l'environnement et en sécurité microbiologique des aliments, **Murielle Naïtali** est enseignante à AgroParisTech, chercheuse à l'Inra et Écrivain-Conseil®. Elle met toutes ses compétences au service du grand public pour lui faire découvrir les mille et une fonctions des microbes. Les dessins de Charlotte Arène accompagnent son texte avec talent.

éditions Quæ
Éditions Cirad, Ifremer, Inra, Irstea
www.quae.com

15 €
ISBN : 978-2-7592-2746-4
9 782759 227464
Réf. : 02620